



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Vítor Hugo Carvalho Martins

Impressão 3D: uma abordagem de produção mais limpa?

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor José Francisco Pereira Moreira

Maio de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor José Francisco Pereira Moreira pela disponibilidade, interesse e espírito positivo demonstrados para a conclusão deste trabalho, assim como pela enorme compreensão pelos momentos que fui passando durante o período de elaboração desta dissertação.

A todas as pessoas que fui conhecendo ao longo deste Mestrado, com as quais foi possível aprender e evoluir um pouco mais em relação àquilo que o curso proporciona.

E como não podia deixar de ser, à Rita pelo apoio, suporte, motivação e carinho incondicional que me passou ao longo desta caminhada. Como sempre falamos: *“Dar um passo atrás para dar dois para a frente”*.

A todos o meu obrigado!

RESUMO

A produção aditiva, representada através de várias técnicas normalmente conhecidas por Impressão 3D (3DP), é uma tecnologia que tem sido cada vez mais alvo de investigação e desenvolvimento como uma eventual alternativa aos métodos tradicionais de fabrico, sendo a resposta à mudança de paradigma produtivo que se tem vindo a gerar. O conceito de Customização em Massa pode ser tornado realidade através de consumidores finais que possuem a capacidade e habilidade de conceber e fabricar o que necessitam.

O 3DP surge como uma possível solução que corresponde a essa necessidade. Esta solução tecnológica oferece um novo paradigma no projeto e produção de bens que terá implicações profundas a nível económico, ambiental e social. Atualmente, o 3DP talvez se encontre num ponto de maturação comparável ao início do desenvolvimento dos computadores ou até dos primórdios da *Internet*. À época, em ambos os casos, haveria pouco ou nenhum conhecimento sobre o real impacto que essas tecnologias iriam ter na sociedade nas décadas seguintes. Essa dificuldade também existe com a tecnologia de 3DP.

Apesar da dificuldade que é prever o impacto de determinada tecnologia, é possível identificar um potencial significativo do 3DP mesmo que apenas de forma grosseira. O 3DP terá um impacto profundo na indústria e na forma como produzimos, na proteção ambiental e no desenvolvimento de Produção mais limpa (CP). O 3DP tem a capacidade de produzir bens personalizados com tamanho de lote unitário, isto é, produzir apenas uma unidade personalizada ao consumidor final, assente na racionalidade de utilização de recursos.

Ao longo desta dissertação procura-se explorar o estado da arte relativamente ao 3DP e a CP, assim como identificar de que forma o 3DP poderá corresponder a uma tecnologia de CP e de que forma a mesma influenciará o mundo em que vivemos e a indústria.

PALAVRAS-CHAVE

Impressão 3D; *Cleaner Production*; Sustentabilidade; *Additive Manufacturing*

ABSTRACT

The Additive Manufacturing (AM), represented through various techniques usually known as 3D Printing (3DP), is a technology that has been increasingly the target of research and development as a viable alternative to traditional methods of manufacture, being the answer to the productive paradigm shift that has been emerging. The concept of mass customization can be realized with final consumers that have the capacity and ability to conceive and produce what they need.

The 3DP is a possible solution to match this need. This technological solution offers a new paradigm in design and production of goods that will have profound implications on the economic, environmental and social levels. Perhaps the 3DP is currently at a maturation point comparable to the beginning of the development of computers, or even the early days of the Internet. At that time, in both cases, there was little or no knowledge about the real impact that those technologies would have on society in the following decades. This difficulty also exists with the technology of 3DP.

Despite the difficulty in predicting the impact of a particular technology, it is possible to identify a significant potential on 3DP. The 3DP will have a profound impact on industry and on the way we produce, on environmental protection and on development of Cleaner Production (CP). Furthermore, the 3DP has the ability to produce custom goods with single-unit batches, that is, to produce a customized unit to the end consumer, based on a rational use of resources.

This dissertation seeks to explore the state of the art regarding 3DP and CP, as well as identify how 3DP may contribute to CP and in which way it will influence the world we live in and the industry.

KEYWORDS

3D Printing; Cleaner Production; Sustainability; Additive Manufacturing

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	XIV
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	2
1.2 Objetivos	5
1.3 Metodologia de investigação.....	5
1.4 Estrutura do documento.....	6
2. Revisão bibliográfica	9
2.1 3D Printing	9
2.1.1 Da Prototipagem Rápida à Produção Aditiva	9
2.1.2 Enquadramento histórico.....	10
2.1.3 Princípios e fundamentos	13
2.1.4 Vantagens.....	18
2.1.5 Técnicas	18
2.1.6 Mercado e tendências futuras.....	25
2.1.7 Aplicações do 3DP	28
2.1.8 Players.....	33
2.2 Cleaner Production (CP).....	34
2.2.1 Sustentabilidade.....	34
2.2.2 Princípios de CP	36
2.2.3 A adoção de CP e a performance.....	42
3. 3DP como Cleaner Production	45
3.1 A evolução do paradigma produtivo e da procura	45
3.2 Análise qualitativa	48
3.3 Análise quantitativa	52

4.	3DP como tecnologia disruptiva	57
4.1	Impacto na vertente social	57
5.	Impacto do 3DP: análise setorial.....	61
5.1	Análise qualitativa	61
5.2	Análise quantitativa	65
5.3	Análise SWOT	70
6.	Conclusões e trabalho futuro	73
6.1	Considerações finais	73
6.2	Sugestões de trabalho futuro	74
	Referências Bibliográficas.....	77
	Anexo I – Tabela 9	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de processos de fabrico (Chua et al., 2010)	13
Figura 2 - Process Flow de 3DP (Wimmer et al., 2015)	17
Figura 3 - Grupo de técnicas de 3DP (Pham & Gault, 1998)	19
Figura 4 - Técnica de Estereolitografia (SL) (Pham & Gault, 1998)	20
Figura 5 - Técnica de Cura Sólida na Base (SGC) (Pham & Gault, 1998).....	21
Figura 6 - Técnica de Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) (Pham & Gault, 1998)	22
Figura 7 - Técnica de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) (Pham & Gault, 1998)	23
Figura 8 - Técnica de Impressão 3D (3DP) (Pham & Gault, 1998)	24
Figura 9 - Técnica de Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM) (Pham & Gault, 1998)	25
Figura 10 - Evolução nas vendas de impressoras 3D individuais (Wohlers, 2016).....	27
Figura 11 - Revisão das previsões para o mercado de 3DP em 2014 (Wohlers, 2014)	27
Figura 12 - Evolução das pesquisas efetuadas sobre 3DP (Wimmer et al., 2015)	28
Figura 13 - Peso das vendas de sistemas 3DP por setor (Wohlers, 2012)	28
Figura 14 - Aplicações do 3DP nos diferentes setores (Wohlers, 2012)	29
Figura 15 - Exemplos de aplicações do 3DP na indústria aeronáutica (3D SYSTEMS, 2015).....	30
Figura 16 - Exemplos de aplicações do 3DP na medicina (3D SYSTEMS, 2015).....	31
Figura 17 - Exemplos de aplicações do 3DP em veículos (3D SYSTEMS, 2015)	31
Figura 18 - Exemplos de aplicações do 3DP na educação (3D SYSTEMS, 2015)	32
Figura 19 - Exemplos de aplicações do 3DP na engenharia (3D SYSTEMS, 2015).....	32
Figura 20 - Exemplos de aplicações do 3DP em bens de consumo (3D SYSTEMS, 2015).....	33
Figura 21 - Empresas que já utilizaram o 3DP (3D SYSTEMS, 2015)	33
Figura 22 - Evolução do paradigma industrial face aos fatores diferenciadores (Chen et al., 2015)	35
Figura 23 - Conceito de Cleaner Production (Institute of Environmental Engineering Kaunas University of Technology, 2000).....	38
Figura 24 - Pirâmide das medidas de CP (Almeida et al., 2015)	41
Figura 25 - Evolução do paradigma produtivo (adaptado de (Chen et al., 2015))	45
Figura 26 - Consumo energético do 3DP vs Injeção em moldes (Chen et al., 2015)	53
Figura 27 - Consumo energético vs tempo de processamento (Chen et al., 2015).....	54

Figura 28 - Consumo energético nas várias fases de vida do produto (Chen et al., 2015)	55
Figura 29 - Custos do 3DP vs Injeção de plástico (Cotteleer, 2014)	56
Figura 30 - Descentralização da produção com recurso ao 3DP (Campbell et al., 2012)	58
Figura 31 - Adoção do 3DP (adaptado de McCutcheon et al., 2014)	66
Figura 32 - Utilização futura do 3DP (McCutcheon et al., 2014).....	67
Figura 33 - Impacto do 3DP como tecnologia disruptiva (McCutcheon et al., 2014).....	68
Figura 34 - Barreiras à introdução do 3DP nas empresas (McCutcheon et al., 2014)	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Marcos da evolução de 3DP (Weber et al., 2013).....	12
Tabela 2 - Comparação das soluções CP e "fim de tubo" (End-of-Pipe) (Institute of Environmental Engineering Kaunas University of Technology, 2000).....	38
Tabela 3 - Princípios e ferramentas de Cleaner Production (Oliveira Neto et al., 2015)	39
Tabela 4 - Resumo dos paradigmas produtivos (Chen et al., 2015).....	46
Tabela 5 - Impacto do 3DP (adaptado de Campbell, Thomas Williams, Christopher Ivanova, Olga Garrett, 2012).....	47
Tabela 6 - 3DP vs métodos tradicionais, segundo princípios de CP (Campbell et al., 2012)	50
Tabela 7 - Implicações do 3DP, segundo vertente ambiental / económica (Chen et al., 2015) .	51
Tabela 8 - Vantagens e desvantagens da aplicação do 3DP a protótipos em ambiente empresarial (Aguiar et al., 2014).....	61
Tabela 9 - Impacto da entrada do 3DP no quotidiano das populações em diversos setores de atividade (Geelhoed, 2014)	62
Tabela 10 - Análise SWOT sobre o posicionamento do 3DP	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

3DP – *3D Printing*

AM – *Additive Manufacturing*

CAD – *Computer-Aided Design*

CAM – *Computer-Aided Manufacturing*

CNC – *Computer Numerical Control*

CP – *Cleaner Production*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

IM – Injeção em Moldes

KG – Quilograma

KWh – Kilowatt-hora

LOM – *Laminated Object Manufacturing*

MIT – *Massachusetts Institute of Technology*

MMR – *Man-Machine Ratio*

RP – *Rapid Prototyping*

SGC – *Solid Ground Curing*

SLS – *Selective Laser Sintering*

STL – *Stereolithography*

UV – Ultravioleta

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*



1. INTRODUÇÃO

No âmbito da unidade curricular “Dissertação em Engenharia Industrial” do 2º ano do Mestrado em Engenharia Industrial da Universidade do Minho procurou-se desenvolver um tema de pesquisa e desenvolvimento que, naturalmente fosse do âmbito da Engenharia Industrial, mas que também fosse de encontro às preocupações que atualmente existem no Mundo e que estão intrinsecamente ligadas, não só com a atividade de um Engenheiro Industrial, mas com a atividade Industrial como um todo. Essas preocupações estão em muito relacionadas com a Sustentabilidade em todas as suas vertentes mas numa em particular, a Sustentabilidade Ambiental.

Face ao aumento das preocupações a nível ambiental com origem em fenómenos como as alterações climáticas ou a diminuição das reservas de recursos naturais (não renováveis), é natural que a procura por soluções alternativas de produção seja atualmente uma realidade, por forma a conseguir ultrapassar os desafios a que o Mundo hoje está sujeito, desafios esses que se foram agravando ao longo das últimas décadas e que estão em muito relacionados com a forma, não só como consumimos bens mas também com a forma como os produzimos. Neste contexto a Impressão 3D poderá eventualmente constituir uma alternativa viável de produção relativamente aos métodos tradicionais de fabrico, considerando que em geral estes últimos estão desfasados do que se preconiza no paradigma de *Cleaner Production* (CP), isto é, uma produção mais limpa e sustentável.

É então importante decifrar o que a Impressão 3D (3DP), suas técnicas e características são capazes de oferecer e principalmente fundamentar o potencial de num futuro próximo esta tecnologia ser capaz de fazer face, não só das necessidades de consumo das populações, mas também de responder às crescentes preocupações ambientais a nível global. Este capítulo introdutório procura elucidar sobre as motivações que levaram ao desenvolvimento do tema, fornecendo enquadramento do mesmo, e enunciando os respetivos objetivos do mesmo, a metodologia de trabalho e a estrutura do documento.



1.1 Enquadramento

Tendo em conta o impacto direto e indireto que a produção Industrial tem sobre o ambiente, parece natural que atualmente se discutam e se tentem encontrar soluções alternativas ao modo como se produz tendo por base os princípios de Ecoeficiência. O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) definiu Ecoeficiência como a produção e entrega de bens e serviços a preços competitivos, que satisfaçam as necessidades humanas e proporcionem qualidade de vida, enquanto reduzem progressivamente o impacto ecológico e a intensidade de utilização de recursos durante o ciclo de vida, para um nível pelo menos em linha com a capacidade de suporte estimada de Terra (relacionado com o conceito de Pegada Ecológica) (Huppés & Ishikawa, 2005). Um facto curioso é que as preocupações ao nível da igualdade e outras de âmbito social não estão incluídas neste conceito de Ecoeficiência, situação que vai em sentido contrário do conceito de Sustentabilidade que engloba as vertentes sociais, económicas e ambientais (Ehrenfeld, 2005). Como tema independente, a Ecoeficiência está bem definida mas é diversificada, tendo em conta as várias visões sobre o problema. A diversidade não deriva apenas de diferentes terminologias desenvolvidas nos mais variados domínios, mas também das mais básicas e subjacentes aproximações teóricas a este tema. Apesar disto, adotar os princípios de desenvolvimento sustentável e utilizar a Ecoeficiência como referencial para o funcionamento das empresas, mantendo elevados os padrões de gestão ambiental, deve ser uma prioridade. Qualquer organização pode usar esta estratégia como forma de diferenciação, não só no mercado onde operam mas também na sociedade tendo em conta a responsabilidade social que atualmente é atribuída às empresas. As medidas de Ecoeficiência associam assim os objetivos da excelência empresarial com a excelência ambiental, de modo a que o comportamento da organização proporcione um desenvolvimento global sustentável (Huppés & Ishikawa, 2005)

A Avaliação do Milénio aos Ecossistemas (2005) demonstrou uma triste deterioração de todos os principais ativos ambientais Mundiais. É essencial que o crescimento económico seja redirecionado para uma direção ambiental benigna, caso contrário as tendências da Avaliação do Milénio são inevitáveis. É particularmente importante que as ações globais a um nível micro (empresas e indivíduos) estejam conciliadas com o que se pretende para a qualidade ambiental a um nível macro, tendo dessa forma consequências direta ou indireta na maioria dos problemas ambientais do planeta. Assim, o objetivo da qualidade ambiental deve ser trazido para a tomada de decisão ao nível micro, seja com políticas públicas ou ações claras de empresas e indivíduos.



É uma exigência que essas políticas e ações reconciliem o bem-estar económico dos mercados com o meio ambiente, pondo em prática medidas de ecoeficiência (Hupples & Ishikawa, 2005). A Sustentabilidade dos processos produtivos tem assim cada vez mais importância para as organizações, assim como para a sociedade. É por isso que a vertente ambiental da Sustentabilidade entra cada vez mais em linha de conta durante o desenvolvimento de produtos e o seu fabrico, permitindo aos produtores diferenciar-se dos vários competidores por forma a aumentar a sua competitividade e aumentar os seus lucros (Le Bourhis, Kerbrat, Hascoet, & Mognol, 2013). Tendo em conta a pressão generalizada sobre as organizações para adotarem processos benignos, várias associações de produção voltaram-se para os seus fornecedores e clientes para encontrar soluções inovadoras para as questões ambientais (Vachon, 2007).

Do ponto de vista ambiental as tecnologias de 3DP aparentam ter um enorme potencial para permitir que se atinjam os níveis de Sustentabilidade produtiva pretendidos, pois através das mesmas será possível produzir de forma mais precisa e flexível, reduzindo o peso dos componentes e economizando recursos, melhorando o desempenho e eficiência energética do processo. Segundo os princípios associados a estas tecnologias de fabrico apenas se consome o material expressamente necessário para produzir o produto, sendo possível eliminar/reduzir a quantidade de resíduos que tem origem na cadeia produtiva. O 3DP tem também o potencial de eliminar a necessidade de transporte desde a fábrica até ao cliente. Alguns acreditam que a tecnologia pode anunciar uma nova era de liberdade e de abertura pois o 3DP está associado a princípios de democratização de *design* e produção. A utilização de plataformas *online* e outras ferramentas digitais permitirá aos indivíduos e comunidades poderem colaborativamente projetar novos produtos que estejam adaptados às necessidades locais e ao indivíduo (Preston, 2013).

As tecnologias de 3DP estão cada vez mais a infiltrar-se no mercado consumidor, prevendo-se que venham a perturbar e modificar os modelos atuais de fabrico pois a ideia de construir uma peça do zero apenas numa máquina, desprendendo-se do conceito de montagem, é uma rutura radical com as formas de fabrico atuais.

O 3DP já vem sendo utilizado em vários setores de atividade permitindo fabricar produtos numa ampla gama de materiais: metais, polímeros, cerâmicos e até tecidos humanos (Abdullah & Hassan, 2001). Contudo, fazendo a associação do termo Impressão 3D com a impressão comum, poderá levar a que se pense que estas tecnologias são tão simples de usar como uma impressora a jatos de tinta ou como uma impressora a laser. Contudo esse facto pode não ser



totalmente verdade. Em primeiro lugar é necessário lidar com o tipo de questões que qualquer indivíduo tem que lidar quando cria objetos sólidos. Isto, entre outras coisas, requer uma quantidade significativa de conhecimento sobre *design* assistido por computador (CAD) e consequentemente que o utilizador invista tempo no desenvolvimento das suas próprias ideias para obter objetos 3D comercializáveis ou com utilidade para o próprio. O 3DP poderá parecer surpreendentemente simples, mas existem questões morais, técnicas e de negócio que devem ser abordadas antes de se tornar parte da vida quotidiana (Sangani, 2013).

O surgimento do 3DP foi consequência da necessidade que existia em construir modelos de engenharia, isto é, peças (protótipos) que auxiliassem a criação de novos produtos e/ou que melhorassem os já existentes. Foi então nessa época que surgiu o conceito de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* - RP) que estava principalmente preocupado com a fabricação automatizada de um modelo ou protótipo através de dados informatizados e de CAD. O mercado está de tal forma competitivo que os novos produtos têm de ser idealizados e testados o mais rapidamente possível para fazer face à concorrência. Para lançar os produtos no mercado de uma forma mais eficiente, é preponderante encurtar os processos que envolvam o *design*, teste e início de produção (Chua, Leong, & Lim, 2010). Modelos físicos 3D do produto de baixo custo e com impactos ambientais reduzidos constituem uma forma superior de análise e validação quando comparados a desenhos 2D ou 3D, gerados e visíveis apenas através de computador. Ao contrário dos modelos de computador que trazem problemas de visualização e de perceção da profundidade do objeto, o modelo físico permite ao utilizador tocar e compreender o objeto, manipulá-lo e ter uma perceção sobre o seu peso, tamanho e textura (Abdullah & Hassan, 2001). Outro aspeto importante do 3DP é que aplicado à customização em massa permite que as organizações criem uma infinidade de produtos sem ter de fazer mudanças de máquina ou ferramentas – *setups* – o que permitirá reduzir o tempo dedicado para estas alterações e consequentemente aumentar o rendimento global do processo (Bak, 2013).

Desde 1981 diversas técnicas de RP foram desenvolvidas, tais como: Estereolitografia (STL – *Stereolithography*), Cura Sólida na Base (SGC – *Solid Ground Curing*); Sinterização Seletiva a Laser (SLS – *Selective Laser Sintering*), a Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM – *Fused Deposition Modeling*); Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM – *Laminated Object Manufacturing*) e a Impressão 3D (3DP – *3D Printing*) (Yongnian, Shengjie, Renji, & Feng, 2009). Algumas destas técnicas irão ser abordadas com mais pormenor ao longo desta dissertação.



Esta dissertação procura enquadrar e analisar o potencial impacto da impressão 3D na forma como fabricaremos bens de consumo num futuro próximo, bem como os possíveis impactos económicos, sociais e ambientais que isso possa trazer. Um ponto pertinente é avaliar se esta tecnologia terá maior viabilidade em determinados setores industriais do que noutros. As questões que se colocam à partida são: será encontrado um mercado amplo, multidisciplinar e global para aplicação desta tecnologia emergente, ou apenas um nicho de mercado com aplicações muito restritas? Estaremos perante uma tecnologia que nos fará repensar, e eventualmente alterar radicalmente, o modo de produzir quebrando as normas de fabrico tradicionais? Estas são algumas questões cuja resposta se procurará dar ao longo da investigação.

1.2 Objetivos

Na elaboração desta dissertação procuram-se atingir os seguintes objetivos:

1. Relatar através de uma revisão bibliográfica o estado da arte do 3DP nomeadamente ao nível das diferentes técnicas, princípios e aplicações, assim como do conceito de CP;
2. Avaliar os impactos ambientais, económicos e sociais do 3DP relativamente aos processos convencionais de produção;
3. Determinar de que forma o 3DP poderá contribuir para a Ecoeficiência e Sustentabilidade Ambiental, essencialmente na produção industrial, face ao seu potencial de simplificar, economizar e melhorar processos;
4. Comparar o potencial do 3DP nos diferentes sectores produtivos.

Estes objetivos foram formulados de forma a dar resposta essencialmente a duas questões de investigação:

- Será o 3DP capaz de revolucionar a forma como iremos produzir num futuro próximo?
- A impressão 3D terá o potencial de suportar o novo paradigma de *Cleaner Production*?

1.3 Metodologia de investigação

O desenvolvimento desta dissertação estará baseado numa forte revisão bibliográfica sobre 3DP, isto é, no suporte a documentação/estudos já elaborados sobre o tema e que deem resposta às perguntas de investigação. Isto significa que existe a necessidade de conhecer e dar resposta



através de investigação ativa às questões que a tecnologia de 3DP levanta no desenvolvimento e fabrico de produtos, tendo em conta que é uma tecnologia emergente e de alguma forma ainda desconhecida, ao cidadão comum.

Também, sempre que possível, recorrer-se-á ao levantamento de dados numéricos (por exemplo: inquéritos), tendo como principal finalidade a de perceber através de observações estruturadas como atualmente já se trabalha com a impressão 3D e qual o futuro da mesma. Ajuizar sobre a forma como esta tecnologia poderá influenciar o mercado é igualmente importante.

1.4 Estrutura do documento

Este documento está organizado em seis capítulos.

No capítulo 1 é efetuado um enquadramento do tema, a definição dos objetivos gerais do trabalho e a descrição da metodologia de investigação utilizada.

O 2.º capítulo leva-nos a uma revisão bibliográfica sobre dois conceitos chave nesta dissertação: o 3DP e o paradigma de CP. No primeiro caso a descrição que se procura efetuar vai de encontro ao estado da arte de 3DP, nomeadamente o enquadramento histórico, seus princípios e fundamentos, vantagens e principais técnicas utilizadas, situação atual do mercado e tendências futuras, demonstração de aplicações resultantes da utilização do 3DP e dos *players* existentes no mercado. No segundo caso procura-se demonstrar o que deu origem ao CP, quais os seus pontos críticos, seus objetivos ao nível da Sustentabilidade e de que forma a sua adoção poderá aumentar a performance empresarial.

No capítulo 3 esta dissertação procura averiguar através de testemunhos, investigações e estudos se de facto a adoção das técnicas e princípios de impressão 3D estão conectados com aquilo que é preconizado como CP, fazendo uma análise à evolução do paradigma produtivo e da procura assim como a análise qualitativa e quantitativa ao desempenho do 3DP no fabrico de produtos.

No capítulo 4 o 3DP é analisado segundo a hipótese de esta constituir como uma tecnologia disruptiva, isto é, capaz de alterar radicalmente não só o modo como se produz, mas também a sociedade em geral. Isto quererá dizer que será fortemente ponderada a vertente social do Desenvolvimento Sustentável quando o 3DP se tornar democratizado e acessível às populações.



No capítulo 5 é apresentada a análise setorial do ponto de vista de adoção/utilização do 3DP, isto é, a avaliação qualitativa e quantitativa do potencial do 3DP nos mais diversos setores industriais. É também apresentada uma análise SWOT sobre o 3DP.

No 6.º e último capítulo são apresentadas as considerações finais assim como eventuais perspectivas de desenvolvimento/seguimento do apresentado nesta dissertação.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 3D Printing

2.1.1 Da Prototipagem Rápida à Produção Aditiva

Prototipagem Rápida (RP), segundo variados tipos de indústrias, era um termo utilizado para descrever o processo de rápida criação de um sistema ou parte do mesmo que representasse o produto final antes do seu lançamento e comercialização, ou seja, um protótipo ou um modelo base a partir do qual (eventualmente) surgisse o produto final. Contudo, com a evolução da tecnologia e dos variados processos de RP, esta definição foi-se desajustando face à qualidade e funcionalidade do *output* oferecido pelos diferentes processos. Se por um lado numa primeira fase o resultado final dos processos de RP serviria apenas para a elaboração de protótipos, com o desenvolvimento tecnológico o produto obtido foi-se assemelhando cada vez mais com o produto final. Face a esse aumento de qualidade para fins de comercialização do produto, o que antigamente era designado por RP passou a ser chamado de Produção Aditiva (*Additive Manufacturing*, em Inglês), pois um dos princípios associados a estas técnicas é que a produção se faz por adição sucessiva de material ao longo do processo (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010)

Atualmente, outros termos são aceites pela comunidade internacional para se referirem às técnicas de AM (além do termo Prototipagem Rápida), vistos de outros pontos de vista e enfatizando outros aspetos relacionados com este tipo de produção (Dawood, Marti, Sauret-Jackson, & Darwood, 2015; Gibson et al., 2010; Yongnian et al., 2009):

- **Produção de livre formato / Produção sólida de livre formato:** direciona para o facto dos métodos de produção terem a capacidade de produzir objetos com formas complexas, aliado à falta de necessidade da utilização de moldes no processo produtivo;
- **Fabricação automatizada:** aponta para a remoção e diminuição de tarefas manuais, cabendo aos computadores e controladores o comando de praticamente todo o processo produtivo;
- **Produção por camadas:** refere a importância da adição de material camada a camada ao longo do processo produtivo;



- **Produção por aumento de material:** aponta para a acumulação e deposição de material ao longo da produção;
- **Produção CAD direta:** refere que a produção é diretamente controlada por modelos CAD e tem a sua origem neles próprios;
- **Impressão 3D (ou 3D Printing):** inicialmente utilizado para descrever máquinas específicas, faz alusão aos princípios de impressão 2D transportados para uma terceira dimensão. Refere-se a um conjunto de tecnologias utilizadas para produzir/imprimir um objeto tridimensionalmente em vez de o produzir da forma tradicional. Este termo relativamente recente, é considerado por muitos como aquele que será mais utilizado quando se fala de um processo de fabrico recorrendo às técnicas de AM (a partir deste ponto do documento será o termo utilizado para se referir às técnicas de AM).

2.1.2 Enquadramento histórico

O 3DP atual tem origem nos primeiros sistemas de RP, contudo todo o caminho percorrido até à obtenção do primeiro sistema de RP é igualmente importante para se perceber o desenvolvimento das várias tecnologias. Assim, os sistemas de RP estão diretamente relacionados com o surgimento de outros elementos que suportaram o seu desenvolvimento como é o caso da introdução dos computadores na indústria e o desenvolvimento de outras tecnologias como por exemplo o CAD. É precisamente esse trajeto que agora se procura demonstrar.

1946 – 1º computador: é com o aparecimento do computador que todas as tecnologias de produção se puderam desenvolver e sustentar, tendo em conta as suas capacidades de processamento e cálculo, gráficas e de trabalho em rede (Weber et al., 2013). Atualmente são os computadores os responsáveis pelo controlo de muitos processos produtivos, desde que devidamente programados, estando claramente associados à diminuição e supressão de diversas tarefas manuais (Chua et al., 2010).

O denominado ENIAC - *Electronic Numerical Integrator and Computer* foi o primeiro computador digital eletrónico de grande escala e tinha como principal função o cálculo de trajetórias táticas de guerra que necessitassem de cálculo matemático (Goldstine & Goldstine, 1996).



1952 – 1ª máquina de controlo numérico (CNC): é anunciada a primeira máquina de controlo numérico como resultado de investigação no MIT. Foram identificadas algumas características e vantagens desta nova tecnologia, tais como: boa precisão e repetibilidade, aumento do tempo útil de corte durante um ciclo e capacidade de gerar geometrias complexas (Groover, 2008). Esta tecnologia de fabrico tem princípios que serviram de apoio ao desenvolvimento dos sistemas de 3DP.

1960 – 1º laser comercial: o surgimento dos lasers é importante para o 3DP na medida em que existem técnicas que dependem em parte dos mesmos, pois os lasers representam um feixe de energia que pode ser facilmente controlado. Atualmente os lasers são utilizados em sistemas de aquecimento ou secagem de produtos de 3DP (Weber et al., 2013).

1963 – Desenvolvimento do CAD: é um dos componentes essenciais do 3DP pois nele se suporta a modelagem dos produtos que posteriormente são fabricados nas máquinas de 3DP. Inicialmente direcionado para o 2D, é em 1963 que chega o primeiro grande desenvolvimento no que ao 3D diz respeito (Chua et al., 2010; Peddie, 2013; Weber et al., 2013).

1981 – 1º sistema de RP: é registado o primeiro grande desenvolvimento através de *Hideo Kodama* que publica um sistema de prototipagem rápida baseado em fotopolímeros (fotopolímero é um material que endurece quando exposto a temperatura) (Goldberg, 2014). Este sistema consistia em expor fotopolímeros líquidos a raios ultravioleta (UV) para que solidificassem camada a camada e formassem um modelo sólido num curto período de tempo, a baixo custo e sem excessiva carga de mão-de-obra (Kodama, 1981). Posteriormente em 1984, *Charles Hull* patenteou o processo de estereolitografia (*'stereolithography'*) e desenvolveu um protótipo baseado nesse mesmo processo (Hull, 1986). A primeira máquina a ser comercializada surgiu em 1987 baseada no processo patenteado por *Hull* (Weber et al., 2013).

É assim possível verificar que até ao surgimento do primeiro sistema de 3DP, diversas tecnologias de suporte tiveram de se desenvolver e de evoluir. É então a partir de 1984 que se verifica um grande avanço na área de 3DP, com diversos marcos que se procuram agora demonstrar.



Tabela 1 - Marcos da evolução de 3DP (Weber et al., 2013)

Ano	Marco
1986	Invenção da técnica de Sinterização Seletiva a Laser (SLS)
1987	Invenção da técnica de Manufatura de Objetos Laminados (LOM)
1987	Comercialização da 1ª máquina de Estereolitografia (STL)
1989	Invenção da técnica de Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM)
1989	Invenção da técnica de Impressão 3D (3DP)
1990	1º Congresso sobre Produção de Livre Formato (<i>Solid Free Format</i>)
1991	1º crânio digitalizado e produzido através de Estereolitografia (STL)
1992	Desenvolvimento do Nylon e de outros materiais
1993	Criação do grupo de Prototipagem Rápida - Sociedade de Engenheiros de Produção
1993	<i>Solingen</i> licencia tecnologia de 3DP do MIT
1994	Invenção do feixe de fusão
1995	Início da Revista de Prototipagem Rápida
1996	Desenvolvimento de ferramentas mais rápidas (por exemplo: <i>3D Systems Quickcast</i>)
1997	1º financiamento por capital de risco para sistemas de 3DP
1997	<i>Align Technologies</i> adota técnica de STL para ortodontia (alinhamento de dentição)
1998	Adoção de STL pela indústria automóvel
1999	1º robot impresso
2000	3DP a cores
2000	Invenção da consolidação por ultrassom
2005	Transição da prototipagem para a produção direta
2006	Desenvolvimento de 3DP <i>desktop</i>
2006	Surgimento do 3DP com metal como matéria-prima
2007	Impressão multimaterial
2008	Primeiros negócios especializados em 3DP
2008	Grande volume de fabrico de máquinas comerciais de 3DP
2009	Formado comité técnico (F42) para 3DP
2009	Utilização de peças de 3DP em <i>Boeing's F-18</i>
2011	Venda de máquinas 3DP pessoais (<i>desktop</i>) ultrapassa as de máquinas 3DP industriais pela 1ª vez

2.1.3 Princípios e fundamentos

Para que cada produto ou componente “ganhe vida”, existem variadas formas de o conseguir, isto é, vários métodos de fabrico.

Os processos de fabrico fundamentais podem ser divididos em três grandes categorias: subtrativos, formativos e aditivos. Os processos subtrativos são iniciados com um bloco de material de tamanho superior ao desejado no final, sendo que o material em excesso vai sendo removido ao longo da produção até se obter a forma final. Como exemplo deste conjunto de processos temos as técnicas de CNC – Computer Numeric Control. Já os processos formativos são aqueles onde são aplicadas forças ou restrições de forma a determinado material para que o mesmo adquira a forma pretendida. A este conjunto de processos está inerente o uso de formas ou moldes para a produção. Por fim, os processos aditivos são aqueles em que o objeto final apresenta um tamanho bastante superior ao material inicial, ou seja, os materiais são manipulados e adicionados, quer em forma de layers ou partes, até se obter a forma final (Chua et al., 2010; Yongnian et al., 2009). Esta dissertação está direccionada para os processos aditivos, nomeadamente para os processos de 3DP e são esses que se procuram explorar. É genericamente considerado que a produção aditiva oferece uma alternativa viável, funcionalmente realizável e tecnologicamente superior relativamente à produção subtrativa (Bourell, Leu, & Rosen David, 2009). A Figura 1 ilustra os três tipos de processos de fabrico mais fundamentais.

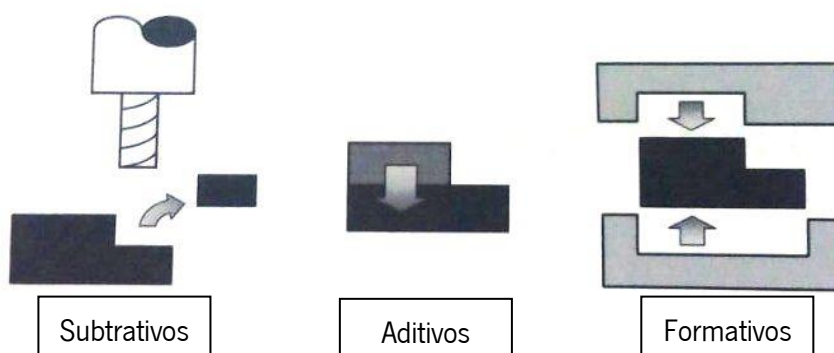


Figura 1 - Tipos de processos de fabrico (Chua et al., 2010)

Cada produto desenvolvido através de uma técnica de 3DP implica que uma série de passos sejam levados a cabo até à obtenção do produto final, começando naturalmente pela parte de desenho do produto. Podem-se definir 8 passos principais na produção através do 3DP, sendo que de técnica para técnica a importância de cada passo, poderá ser diferente (Gibson et al.,



2010; Moza, Kisakis, Kechagias, & Vaxevanidis, 2015; Wimmer, Steyrer, Woess, Koddenberg, & Mundigler, 2015; Y. Yan et al., 2009).

1. Modelação e CAD

Qualquer produto obtido através de uma técnica de impressão 3D passa anteriormente pela fase de modelação. Esta fase consiste em, recorrendo a software de desenho assistido por computador (também conhecido por CAD), desenvolver em suporte informático o produto que se pretende fabricar. Eventualmente e com o aparecimento de novas tecnologias poderão recorrer-se a *scanners* que permitam obter um produto base e a partir daí alterar conforme o que se pretende (Wimmer et al., 2015).

2. Conversão para STL

O termo STL deriva da primeira técnica de 3DP comercializada, a Estereolitografia. Um ficheiro STL é uma forma simples de descrever o ficheiro CAD relativamente à sua geometria, removendo qualquer informação referente à construção e modelação do objeto, recorrendo para isso a um conjunto de polígonos que se ajustam à superfície do modelo construído. É importante referir que atualmente quase todas as técnicas de 3DP utilizam ficheiros STL para a conceção de produtos, sendo que a maioria dos *softwares* de CAD têm capacidade para definir o tamanho mínimo dos polígonos de ajuste de geometria, com o objetivo de garantir que os modelos criados não apresentam nenhuma face de triângulo no produto final. Outro aspeto relevante está relacionado com os erros que os *softwares* CAD possam realizar durante a conversão do modelo para STL. Para auxiliar nessa questão, existem hoje ferramentas, desenvolvidas para detetar e corrigir os erros resultantes da conversão CAD para STL.

3. Transferência para a máquina e manipulação do ficheiro STL

A partir do momento em que o modelo CAD foi convertido para STL, este apresenta condições para ser enviado para a máquina de impressão. Contudo, nesta altura deverão ser tidos em conta fatores relacionados com o modelo no ficheiro STL, pois a partir do momento em que é dada a ordem de impressão, já nada poderá ser modificado. Esses fatores são o tamanho, a sua posição e a orientação, sendo objetivo colocá-lo na posição mais adequada para ser impresso.



4. Configuração da máquina

A configuração da máquina é outro fator a ter em conta antes de dar a ordem de impressão do objeto e que é específico quer da máquina utilizada, quer da técnica escolhida. Os parâmetros mais importantes a serem configurados estão relacionados com a matéria-prima, as fontes de energia utilizadas, a espessura de cada camada e o tempo de processamento do objeto. Como exemplo, uma máquina pode utilizar apenas um ou dois materiais como matéria-prima, assim como nenhuma variação ao nível da espessura de cada camada, o que faz com que as necessidades de *setup* sejam necessariamente menores relativamente a uma máquina mais complexa, que utilize variados materiais, assim como variações ao nível da espessura da camada. Uma curiosidade é que um *setup* errado não resulta necessariamente numa peça com defeito, mas sim numa peça com fraca qualidade.

5. Fabrico

Ao contrário dos passos anteriores, que são semiautomáticos pois requerem em determinado momento alguma ação manual ou interação por parte do utilizador, a fase de fabrico depende exclusivamente da operação da máquina. É nesta fase que muitos dos princípios de 3DP são verificados, nomeadamente o processo de construção com base na deposição (ou separação) sucessiva de material, e consequentemente o processamento camada a camada. O processo é repetido sucessivamente até se obter a forma final do objeto. Nesta fase é apenas necessária alguma supervisão sobre a máquina caso a mesma emita algum tipo de alarme como a falta de material, falha de energia ou falha de *software*. Contudo, em condições normais, nenhuma ação manual é necessária estando o sistema em perfeitas condições.

6. Remoção e limpeza

Uma vez terminado o processo de impressão, é necessário que a peça seja removida da máquina. Para isso é necessário interação com a mesma e alguns cuidados de segurança, nomeadamente ao nível da temperatura de operação que deverá ter descido o suficiente, e também já não devem existir partes da máquina em movimento. Em condições ideais o objeto estaria em condições de ser utilizado, contudo isso nem sempre acontece. Contudo, variadas vezes é necessário efetuar aquilo que se designa por acabamento, quase sempre devido ao material de suporte que é utilizado para construção da peça. Este material de suporte permite que



a construção se processe sem que o material pertencente ao objeto final se desmorone ou empene durante o fabrico. É importante referir que, nesta fase, qualquer erro de manuseamento do objeto na altura da remoção do material de suporte, poderá resultar numa diminuição brutal da qualidade do *output*. Este passo de limpeza pode também ser considerado como o início da fase de pós-processamento do objeto.

7. Pós-processamento

O pós-processamento diz respeito às etapas de acabamento dos objetos para posterior aplicação e poderá envolver atividades abrasivas, como o polimento e lixamento ou a aplicação de revestimentos de superfície. Esta fase é já muito específica do objeto final pois depende em muito da finalidade para que o objeto foi construído, ou seja, um objeto que tenha uma aplicação “mais nobre”, irá naturalmente ter maiores exigências ao nível do acabamento. Outro fator decisivo a ter em conta, relativamente à quantidade de trabalho que os acabamentos irão exigir, está relacionado com o processo utilizado no fabrico, pois enquanto uns conseguem uma maior eficiência e qualidade de produção, outros produzem componentes relativamente frágeis que exigem a aplicação de revestimentos para aumentar a resistência final. Como parece ser natural, esta fase está fortemente relacionada com atividades manuais, contudo é cada vez mais comum que algumas atividades beneficiem do uso de ferramentas elétricas e equipamento adicional como fornos de secagem.

8. Aplicação

Após o pós-processamento, o objeto final apresenta-se em condições de ser aplicado. É importante referir que objetos produzidos com materiais semelhantes aos utilizados noutros métodos de fabrico (como a moldagem e a fundição, por exemplo) podem comportar-se de forma diferente face às especificações *standard* do material. Esta situação pode ocorrer uma vez que a algumas técnicas de 3DP está associada, de forma intencional, a criação de vazios ou bolhas dentro do objeto. Esses pontos poderão dar origem à rotura do objeto através dessas zonas, situação essa implica que o objeto construído através de 3DP apresente um comportamento diferente daquele que resulta do uso de um processo de fabrico convencional.

Tendo em conta que o processo de fabrico do objeto (processo físico), praticamente não necessita de intervenção manual, isto é, o objeto é produzido pelo equipamento de inicio a fim sem necessidade de intervenção humana, faz com que a máquina tenha um papel ainda mais preponderante relativamente a outras indústrias em que a montagem se executa por meios manuais, componente a componente. Com isto as preocupações ao nível dos equipamentos são superiores por forma a manter os padrões *standard* dos equipamentos, ou seja, os cuidados a ter com as impressoras 3D são superiores, pois as mesmas não são uma simples ferramenta de suporte, mas sim as maiores responsáveis pelo desenvolvimento do objeto. Como consequência, a periodicidade de manutenção das máquinas e os cuidados no seu manuseamento são necessariamente superiores, pois o processo depende praticamente apenas das impressoras 3D (Gibson et al., 2010).

A Figura 2 representa a sequência de operações do processo (*Process Flow*) de 3DP.

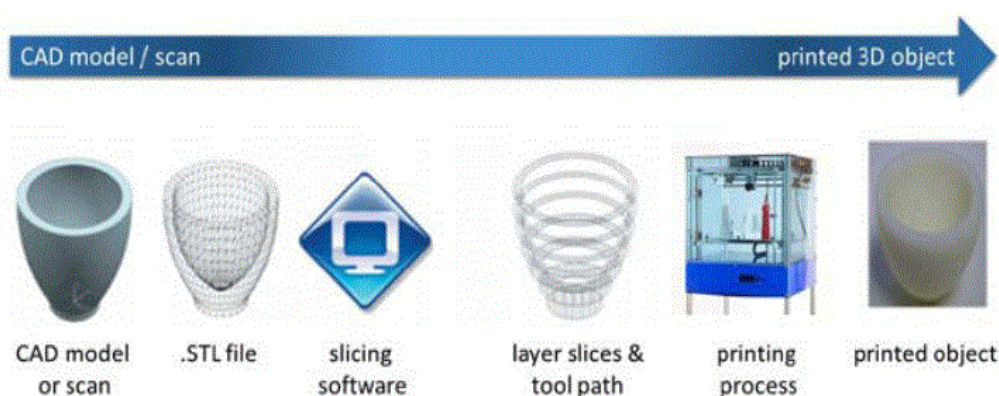


Figura 2 - Process Flow de 3DP (Wimmer et al., 2015)

Independentemente das técnicas e das máquinas que surgiram ao longo do tempo, o *Process Flow* e os princípios associados eram iguais. Isto levou a que um conjunto de fundamentos transversais às técnicas de 3DP fossem formulados (Chua et al., 2010):

- O modelo é construído através de um sistema de CAD/CAM cujas características deverão ser as de um volume fechado, de forma a garantir que as seções horizontais necessárias para a construção do objeto sejam curvas fechadas. Desta forma está criado o suporte para que uma camada seja suportada pelas anteriores;
- O modelo a ser fabricado é convertido para um formato designado por STL, que aproxima as superfícies do modelo a polígonos. Quanto mais curva for a superfície, maior número de



polígonos irá exigir. Da mesma forma, uma maior qualidade do objeto final exige um maior número de polígonos que se ajustam à face do objeto;

- O modelo a ser fabricado e que está definido através de um ficheiro STL, é fatiado em seções horizontais fechadas através de *software* apropriado. Cada fatia corresponde à camada de material que é colocada sobre a anterior, camada após camada.

2.1.4 Vantagens

A produção através de 3DP apresenta alguns benefícios relativamente aos processos tradicionais de fabrico. São eles, segundo Campbell et al (2012):

- *Design* e Produção digital: a produção é iniciada após modelação do produto em ficheiro digital STL. Uma das vantagens de produzir diretamente do modelo é que o produto final reflete precisamente o pretendido, reduzindo dessa forma a maior variabilidade que se verifica nos processos tradicionais de fabrico;
- Complexidade grátis: um dos grandes benefícios é a possibilidade de criar objetos complexos que não seriam possíveis através de outro meio. Também não existe custo adicional ou aumento do *Lead Time* (tempo de ciclo) no caso de produção de peças mais complexas, assim como de peças diferentes umas das outras, de lote de produção unitário;
- Produção instantânea a uma escala global: a representação de objetos através de um ficheiro digital permite a sua rápida e fácil distribuição e consequentemente a produção em qualquer impressora 3D, disponível em qualquer parte do mundo com os materiais necessários, com as características e parâmetros do ficheiro;
- Redução do desperdício: todos os processos de 3DP são intrinsecamente “verdes”. Devido à deposição de material camada a camada, apenas o material necessário é utilizado na produção diminuindo dessa forma o desperdício associado à produção, existindo um “zero virtual de desperdício”.

2.1.5 Técnicas

Como já referido anteriormente, os processos de fabrico fundamentais podem ser divididos em três grandes categorias: subtrativos, formativos e aditivos. Por sua vez, a categoria de processos aditivos, onde se englobam as técnicas de 3DP, pode ser subdividida tendo em conta o estado da matéria-prima: seja ele líquido, sólido ou em partículas. Isto significa que as diferentes

técnicas existentes estão muito relacionadas com o estado da matéria-prima (Pham & Gault, 1998).

Procura-se agora efetuar uma breve descrição das técnicas de 3DP mais relevantes, sendo que atualmente muitas delas já possuem várias variantes, mas com o mesmo princípio básico. A Figura 3 apresenta as várias técnicas de adição de material.

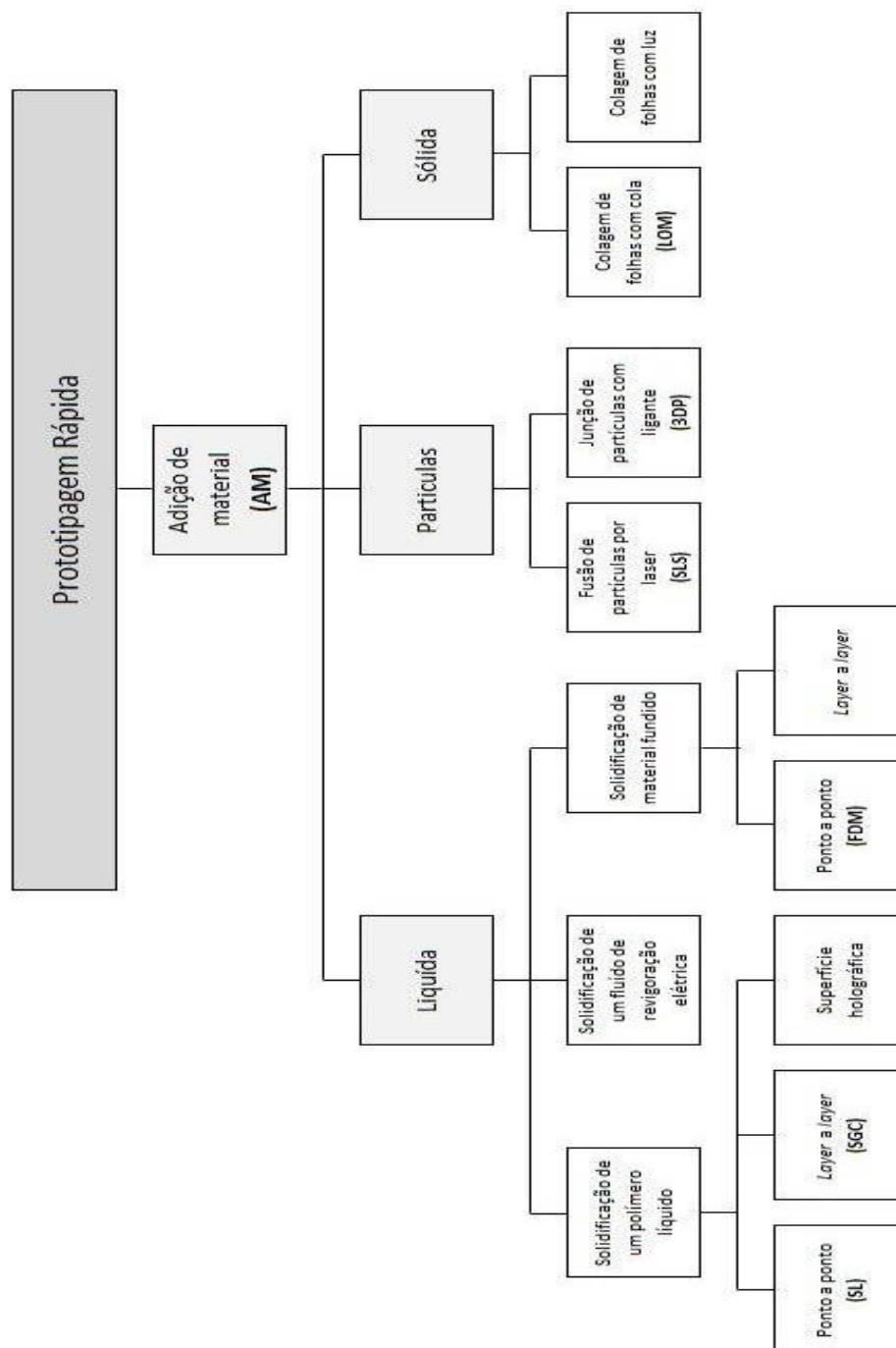


Figura 3 - Grupo de técnicas de 3DP (Pham & Gault, 1998)

Matérias-primas líquidas

A - Estereolitografia (STL - *Stereolithography*)

É a técnica de 3DP mais marcante porque foi através dela que tudo se desenvolveu, a partir de 1984, ou seja, foi esta tecnologia o suporte para o desenvolvimento das restantes. O princípio associado a esta técnica é a solidificação de uma resina fotossensível (polímeros líquidos) através da incidência de raios UV. O modelo é construído sobre uma plataforma situada imediatamente abaixo da superfície do líquido onde o raio laser de alta precisão incide, formando a primeira seção transversal do modelo, isto é, a camada inicial de material solidificado, deixando o restante material no estado líquido. Posteriormente, a plataforma baixa a altura correspondente à próxima camada e o raio laser incide novamente sobre essa espessura líquida, formando a 2ª camada de material, depositada em cima da 1ª. Este processo é repetido sucessivamente até que o modelo esteja fabricado, sendo necessário no final retirar o modelo da plataforma, lavá-lo, remover o material de suporte e levar o modelo a um forno de cura (Abdullah & Hassan, 2001; Chua et al., 2010; Dawood et al., 2015; Pham & Gault, 1998; X. Yan & Gu, 1996). A Figura 4 ilustra a técnica de Estereolitografia.

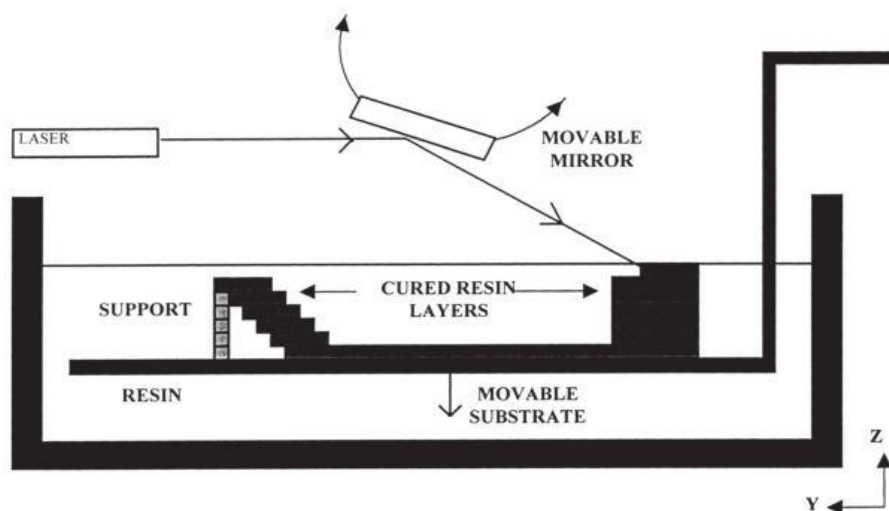


Figura 4 - Técnica de Estereolitografia (SL) (Pham & Gault, 1998)

B - Cura Sólida na Base (SGC – *Solid Ground Curing*)

Esta técnica é muito semelhante à de STL na medida em que também utiliza radiação UV e resina fotossensível, contudo a solidificação ocorre simultaneamente para toda a camada, conforme ilustrado na Figura 5, enquanto na técnica de STL ocorre ponto a ponto. Inicialmente a

espessura de resina pretendida é depositada na plataforma de construção e uma máscara é colocada sobre essa superfície (à semelhança de um *stencil*). A função dessa máscara é garantir que quando o laser incidir sobre ela, apenas a radiação UV que passa pelos seus orifícios irá atingir a resina. Cada uma das camadas possui uma máscara própria pois cada camada terá as suas próprias dimensões. Um aspeto interessante e diferente relativamente à técnica de STL é que o excesso de resina é removido da plataforma de construção após a solidificação da camada, sendo substituída por cera que desta forma se torna o material de suporte até final do processo, quando é retirada do modelo final. Estes passos são repetidos sucessivamente até se obter o modelo, não sendo necessário no final efetuar a cura utilizada na técnica de STL (Pham & Gault, 1998).

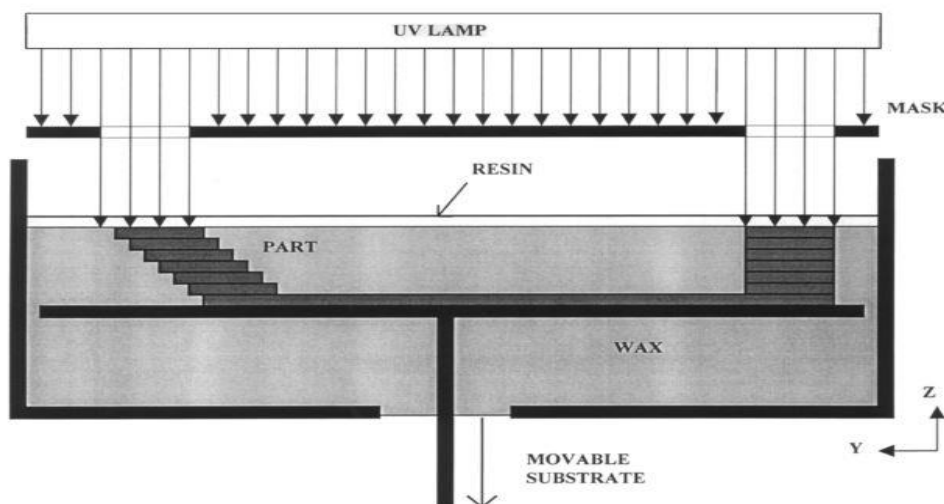


Figura 5 - Técnica de Cura Sólida na Base (SGC) (Pham & Gault, 1998)

C - Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM – *Fused Deposition Modeling*)

O princípio associado a esta técnica é a solidificação de material fundido. A máquina possui uma cabeça com dupla função: (1) fundir o material; (2) depositá-lo na plataforma. Importante referir que a cabeça de extrusão se movimenta num plano XY, isto é, na horizontal e também na vertical. A plataforma onde o material é depositado é mantida a uma temperatura inferior à do material para que o mesmo solidifique rapidamente e desta forma não ocorram distorções no modelo. Posteriormente essa plataforma baixa para que a cabeça de extrusão deposite nova camada de material, conforme ilustrado na Figura 6. Um aspeto interessante tem a ver com o facto das máquinas mais recentes já possuírem duas cabeças de extrusão: uma para o material

com que se constrói o modelo e outra para a deposição de material de suporte, que no final do processo será retirado (Abdullah & Hassan, 2001; Chua et al., 2010; Dawood et al., 2015; Pham & Gault, 1998; X. Yan & Gu, 1996).

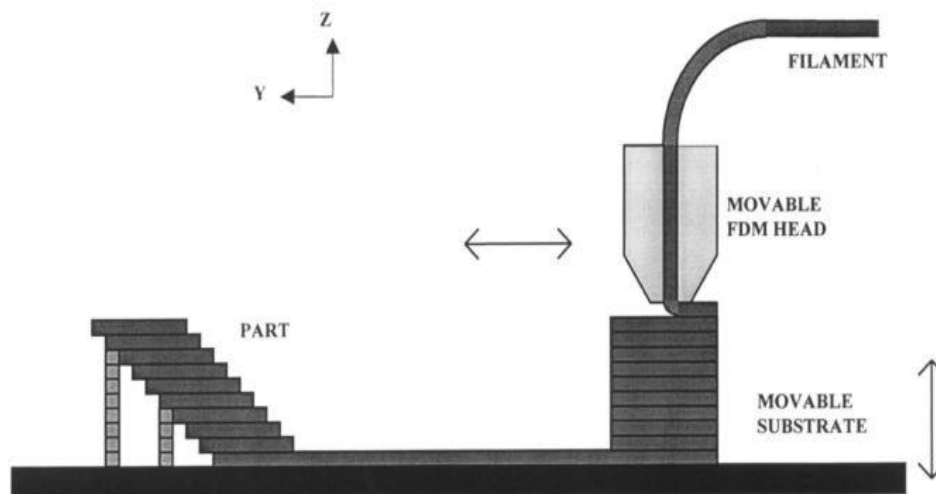


Figura 6 - Técnica de Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) (Pham & Gault, 1998)

Matéria-prima em partículas

A - Sinterização Seletiva a Laser (SLS – *Selective Laser Sintering*)

Nesta técnica o material é constituído por partículas, ou aquilo que comumente se chama por “pó”. A máquina possui um cilindro onde está depositada a matéria-prima. Quando o processo se inicia, esse cilindro sobe a altura correspondente à espessura da camada de material a depositar, expondo o material ao longo de uma superfície para que um rolo deslize sobre a mesma e deposite esse material exposto num outro cilindro (ver Figura 7). Esse cilindro é também composto por uma plataforma inferior que irá suportar a construção do modelo ao longo do processo e que vai baixando sempre que nova camada de material é depositada nesse cilindro (ver Figura 7, o cilindro do lado direito). Assim, quando novo material é depositado no cilindro de construção, um laser de alta precisão incide sobre o material para que o mesmo seja solidificado em conjunto, camada a camada. Todo o cilindro onde o modelo se desenvolve está cheio de material, mas devido à alta precisão do laser apenas a camada com a espessura pretendida é sinterizada. O restante material serve de suporte à construção do modelo, devendo no final ser retirado e reaproveitado. Devido à elevada temperatura de operação o modelo final corre o risco de apresentar distorção, sendo necessário por vezes arrefecer o modelo ao longo do processo

(Abdullah & Hassan, 2001; Chua et al., 2010; Dawood et al., 2015; Pham & Gault, 1998; X. Yan & Gu, 1996).

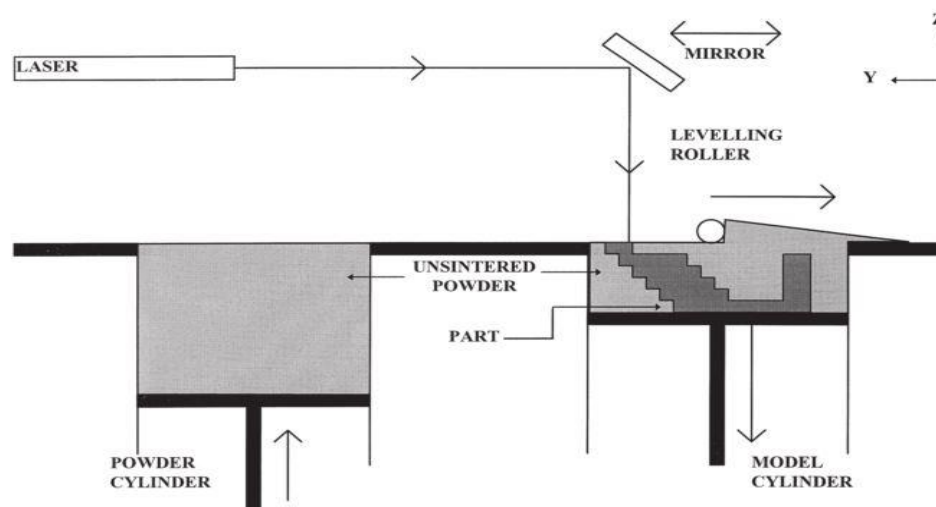


Figura 7 - Técnica de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) (Pham & Gault, 1998)

B - Impressão 3D (3DP – 3D Printing)

À semelhança da técnica anterior a matéria-prima também é “pó”, ocorrendo contudo a sinterização através do material ligante que é depositado sobre a matéria-prima principal (o pó) através de uma agulha, como se um jato de tinta se tratasse (daí o nome da técnica ser *3D Printing*). Assim que a deposição de todas as camadas de ligante esteja concluída, é necessário que o modelo seja aquecido para que a definição entre a zona que possui ligante da que não possui se conclua. Posteriormente, o excesso de pó que serviu de suporte para a construção do modelo é removido mergulhando o modelo num banho de água. Na fase final da construção o modelo é ainda submetido a uma cura para conclusão da sinterização, podendo também ser mergulhado num banho de ligante para que a sua resistência aumente (Abdullah & Hassan, 2001; Chua et al., 2010; Pham & Gault, 1998; X. Yan & Gu, 1996). Uma ilustração desta técnica encontra-se na Figura 8.

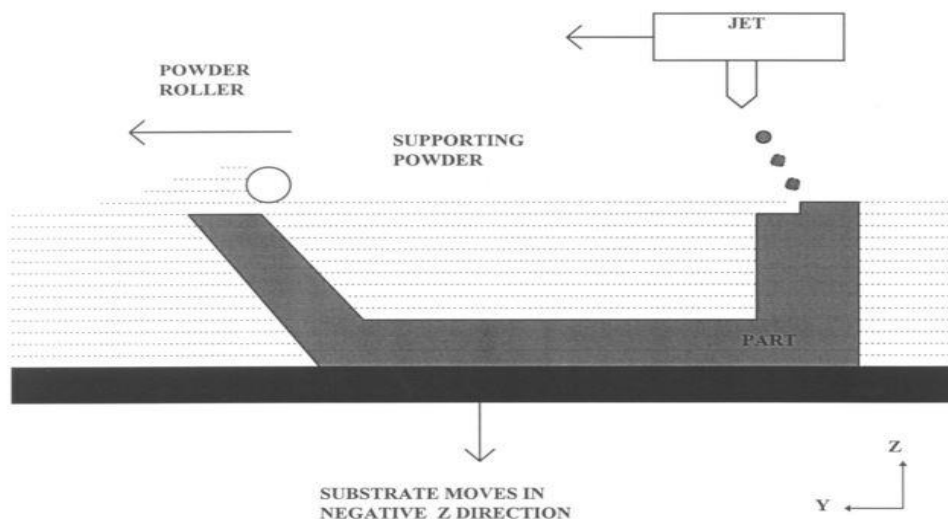


Figura 8 - Técnica de Impressão 3D (3DP) (Pham & Gault, 1998)

Matéria-prima sólida

A - Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM – *Laminated Objet Manufacturing*)

Nesta técnica a matéria-prima é papel adesivo em que a cola desse papel é ativada através do calor transferido por um rolo (ver Figura 9). O rolo tem duas funções: auxiliar a colocar a matéria-prima sobre a plataforma de construção, onde inicialmente existe uma base de papel e fita-cola de dupla face que recebe essa primeira camada de material, e também transmitir a essa camada de material o calor necessário para que a mesma ganhe aderência à camada anterior. À semelhança do processo de STL, existe também um raio laser de alta precisão responsável pelo corte do contorno do primeiro *layer* (pois é necessário garantir que corta apenas a última camada de material) e também pelo corte do negativo dessa camada no rolo de abastecimento. Um aspecto interessante desta técnica é que o material em excesso resultante do corte do negativo que vai além do contorno da camada de material necessária para o modelo, é cortado em pequenos retângulos para que a sua remoção seja mais fácil mas é mantido ao longo do processo, servindo de suporte para as camadas superiores de material. Posteriormente a plataforma baixa a altura correspondente à altura da camada seguinte e o processo é repetido o número de vezes correspondente às camadas de material necessárias até obter o modelo final. No final deste processo e tendo em conta que o material é tendencialmente de papel (diz-se tendencialmente porque atualmente já surgiram outros materiais como o plástico), é necessário que o modelo possua um acabamento de verniz para garantir a sua resistência à humidade (Abdullah & Hassan, 2001; Chua et al., 2010; Dawood et al., 2015; Pham & Gault, 1998; X. Yan & Gu, 1996).

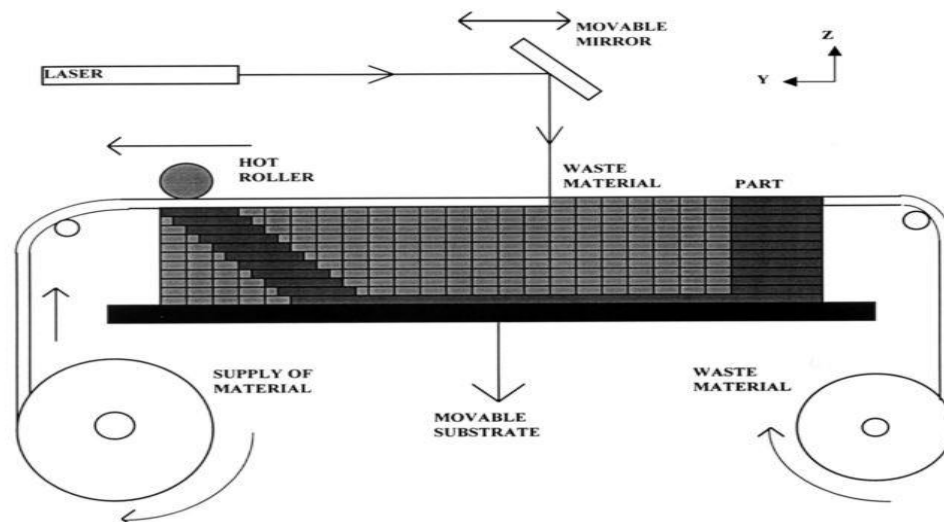


Figura 9 - Técnica de Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM) (Pham & Gault, 1998)

Como já referido anteriormente, atualmente estas técnicas têm já variantes dependendo do fabricante da máquina.

2.1.6 Mercado e tendências futuras

Em 1995, *Terry Wohlers*, num artigo que pretendia prever o futuro das técnicas de RP (Wohlers, 1995), definiu os fatores que iriam influenciar o crescimento do 3DP num futuro próximo. Esses fatores, naturalmente transferíveis para a realidade atual e que têm contribuído ativamente para o crescimento da tecnologia, são:

- Consciencialização: muitas empresas que desconheciam o custo e a performance da tecnologia de 3DP estão neste momento mais informadas/consciencializadas sobre o assunto. Muita da responsabilidade de transmissão de informação, que deveria pertencer aos fabricantes de máquinas de 3DP, está hoje “atribuída” a departamentos que se têm especializado na investigação e divulgação desta tecnologia através de publicações e seminários, isto é, grupos de investigação sem fins lucrativos que se dedicam à exploração destas técnicas;
- Eliminação de mitos: muitos acreditam que os produtos fabricados através de 3DP são dimensionalmente imprecisos e frágeis. O avanço cada vez maior das tecnologias e máquinas associadas, além do aumento da qualidade das matérias-primas, faz com que atualmente esse facto esteja cada vez mais afastado da realidade. Muitos dos produtos



fabricados através de 3DP estão hoje já com uma qualidade de acabamento igual ou próxima da dos fabricados através dos processos tradicionais de produção;

- Preocupações organizacionais: o 3DP está hoje identificado como potencial diferenciador no mercado global, isto é, uma empresa que o adote poderá estar hoje mais perto do sucesso face a outra que se mantenha agarrada aos processos tradicionais de fabrico.
- Melhorias técnicas: vários sistemas que antes eram utilizados apenas para a conceção de protótipos, estão hoje a ser utilizados para o fabrico de produto final. Isto deve-se à melhoria da qualidade do *output* das máquinas e das matérias-primas e à diminuição da complexidade em operar com os parâmetros das máquinas. O 3DP, suportado por tecnologias complementares como *softwares* de desenho e *scanners*, poderá permitir às organizações trabalharem de forma mais rápida e precisa.

O estado atual, assim como o estado futuro, do mercado de 3DP é consequência do grau de solidificação dos fatores acima enunciados. Segundo o *Wholers Report* de 2016, atualmente considerado como o mais reconhecido e prestigiado relatório sobre AM, a indústria de 3DP cresceu para um valor estimado de \$5 mil milhões de dólares durante o ano de 2015 (ver Figura 11), o que se traduz num crescimento do mercado de aproximadamente 25,9% durante esse ano, enquanto no ano de 2014 o crescimento foi de 34,9%, a maior taxa verificada nos últimos 17 anos. Nos últimos três anos a taxa de crescimento associada a esse período foi de 33,8%. Nos últimos 27 anos a indústria cresceu em média 26,2% ao ano, demonstrando uma grande consistência no seu desenvolvimento (Wohlers, 2016). Estes valores fazem com que a expectativa sobre o futuro desta tecnologia seja naturalmente elevadíssima. Os valores apresentados estão suportados por dados colecionados através de 51 produtores industriais que recorrem a tecnologias de 3DP, 98 fornecedores de serviços de 3DP, 15 produtores de matérias-primas para 3DP, muitos produtores de impressoras 3D *low-cost* e ainda de 80 peritos em 3DP oriundos de 33 países diferentes, ou seja, vários elementos relacionados com o processo de produção através de 3DP.

Outro fator a ter em conta ao avaliar o crescimento do 3DP, está relacionado com o número de *players* existentes no mercado no que à produção de sistemas industriais de 3DP (avaliados em mais de \$5000 dólares) diz respeito. Se em 2011 existiam 31 empresas produtoras, em 2014 esse valor chegou às 49 e em 2015 aos 62 produtores de sistemas de 3DP, o que significa que

o valor de 2011 duplicou em apenas 5 anos, demonstrando mais uma vez o enorme crescimento desta tecnologia. Na vertente “individual” do 3DP relacionada com as impressoras 3D *desktop*, estima-se que o crescimento verificado foi enorme pois passou-se de 160.000 unidades vendidas em 2014 para 278.000 em 2015, conforme se pode visualizar no gráfico da Figura 10 (Wohlers, 2016).

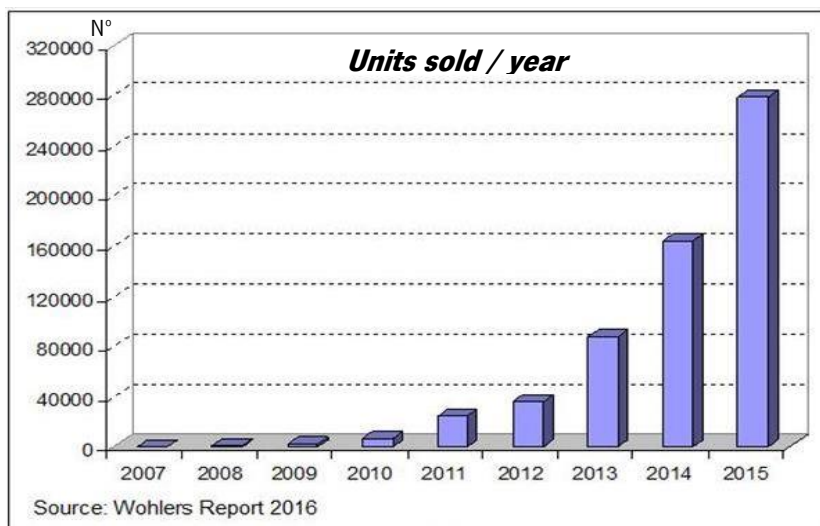


Figura 10 - Evolução nas vendas de impressoras 3D individuais (Wohlers, 2016)

À semelhança do estado atual do mercado, o *Wholers Report* define anualmente as suas previsões para o mercado de 3DP. Contudo com a velocidade de evolução das tecnologias e do mercado de 3DP, parece difícil prever o futuro das diversas tecnologias. Conforme ilustrado na Figura 11, as previsões para a indústria global de 3DP têm sido revistas em favor de um crescimento mais alargado do que anteriormente previsto (biliões = mil milhões, escala americana).

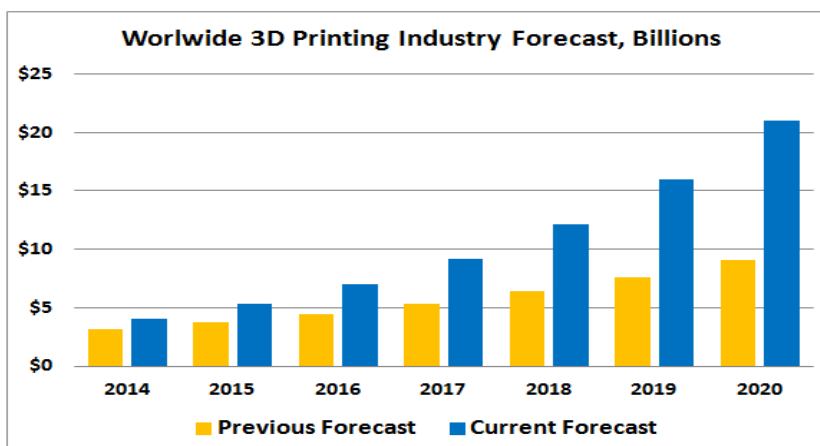


Figura 11 - Revisão das previsões para o mercado de 3DP em 2014 (Wohlers, 2014)

Outro dado que leva a afirmar que a indústria de 3DP está a crescer e a suscitar interesse a nível global está relacionado com as pesquisas efetuadas na *Internet* sobre o assunto até 2015. Na Figura 12 é possível verificar essa evolução, onde o valor máximo verificado é o valor de referência e definido como 100% variando as restantes percentagens em função desse valor.

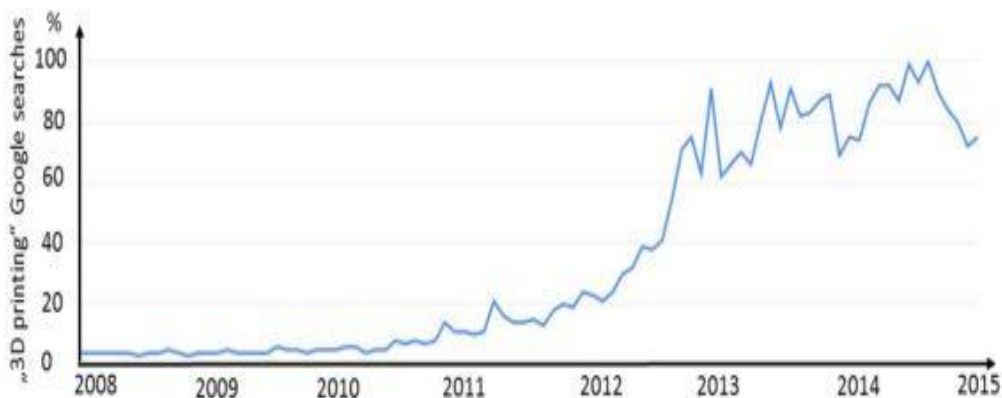


Figura 12 - Evolução das pesquisas efetuadas sobre 3DP (Wimmer et al., 2015)

2.1.7 Aplicações do 3DP

Já existem várias aplicações do 3DP nos mais variados setores, setores esses que naturalmente necessitam do equipamento adequado para o fabrico de produtos. A Figura 13 representa o peso das vendas de produtos 3DP relacionados com diversos setores de atividade. A Figura 14 faz referência aos tipos de aplicações para os quais o 3DP é utilizado (Wohlers, 2012). De seguida pretende-se demonstrar três exemplos dessas aplicações.

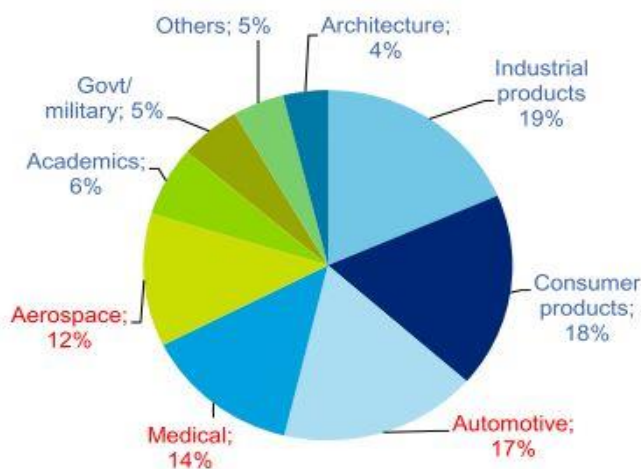


Figura 13 - Peso das vendas de sistemas 3DP por setor (Wohlers, 2012)

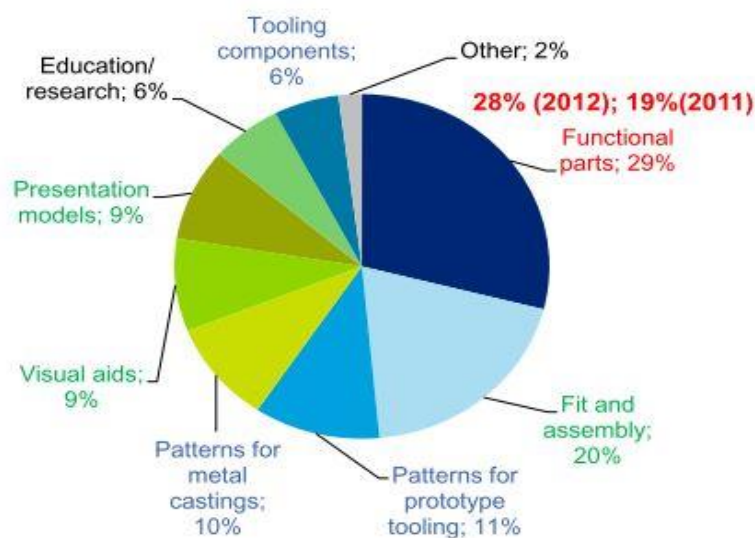


Figura 14 - Aplicações do 3DP nos diferentes setores (Wohlers, 2012)

A – Indústria aeronáutica

O 3D tem vindo a ser utilizado para o fabrico de componentes complexos para a indústria aeronáutica. Empresas como a *Airbus* e a *Boeing* utilizam o 3DP para aumentar a performance dos seus equipamentos através da produção de peças mais leves e fortes relativamente às fabricadas através dos processos convencionais, o que se traduz numa poupança significativa no fabrico propriamente dito, mas também nas reduções de emissões de carbono associadas e também no consumo de combustível devido ao menor peso das peças (Jewell, 2013).

A *General Electric*, juntamente com a sua subsidiária *CFM Internacional*, tem vindo a utilizar partes tridimensionais nos seus motores, nomeadamente as pontas dos mesmos. A previsão de entrada em funcionamento em aviões comerciais seria no início de 2016 e nesse caso a *General Electric* necessitaria de produzir 25 mil peças durante 3 anos para satisfazer essas necessidades (cada motor usaria 10 a 20 peças fabricadas através de 3DP, o que se traduziria numa produção em massa) (Lamonica, 2015).

Outra subsidiária da *General Electric*, a *Avio Aero* – companhia Italiana, desenvolveu uma tecnologia revolucionária de 3DP utilizando partículas metálicas como matéria-prima. O objetivo final seria a produção de pás metálicas ultraleves com uma elevada qualidade e a um menor preço (Aero, 2015)

São, portanto, vários os exemplos de empresas do setor aeronáutico que vão utilizando o 3DP para aumentar a performance dos seus equipamentos e consequentemente do seu negócio. A Figura 15 mostra algumas dessas aplicações.



Figura 15 - Exemplos de aplicações do 3DP na indústria aeronáutica (3D SYSTEMS, 2015)

B – Medicina

É talvez o setor mais interessante em que o 3DP é utilizado. Uma das aplicações do 3DP neste setor são os transplantes ósseos, isto é, a produção de próteses ósseas. O fabrico através desta técnica faz com que a prótese se adapte na perfeição às necessidades do paciente (personalizável) a um custo mais baixo (Herbert, Simpson, Spence, & Ion, 2005). Uma outra possibilidade, ainda mais incrível, que o 3DP oferece, é a reconstrução de tecidos humanos (Smith et al., 2004).

Também na medicina dentária o 3DP tem tido um impacto elevado. Com fundamentos na modelagem 3D em formato digital através das tecnologias CAD, o 3DP permite transformar essas imagens em realidade, produzindo peças complexas através dos ficheiros digitais, numa elevada gama de materiais em centros industriais ou no local. A impressão de alta resolução em resina vem sendo utilizada para imprimir modelos de próteses dentárias (Dawood et al., 2015).

Ainda na mesma área, o 3DP tem vindo a ser utilizado para o desenvolvimento de modelos (protótipos) que auxiliem no planeamento e na definição de tratamentos complexos a aplicar ao paciente no que à cirurgia dentária/craniana/maxilar/facial diz respeito (Dawood et al., 2015). O mesmo é referido por Moza et al. (2015), onde são referidas diversas aplicações do 3DP na medicina, nomeadamente: implantes; próteses; reconstrução de tecidos; modelagem. A Figura 15

demonstra algumas aplicações do 3DP na medicina (próteses ósseas, próteses de dentes, próteses de tecido).



Figura 16 - Exemplos de aplicações do 3DP na medicina (3D SYSTEMS, 2015)

C – Indústria automóvel

À semelhança do referido para a indústria aeronáutica, diversas produtoras de automóveis (*Land Rover, Jaguar, Audi e General Motors*) têm vindo a utilizar o 3DP para produção de componentes para o seu produto final. Mais uma vez estes produtores conseguem obter à custa do 3DP peças mais leves e resistentes a um custo mais baixo, maximizando dessa forma a sua atividade (Ezeiruaku, 2015). A Figura 17 apresenta vários exemplos da aplicação do 3DP em veículos (variados componentes automóveis).

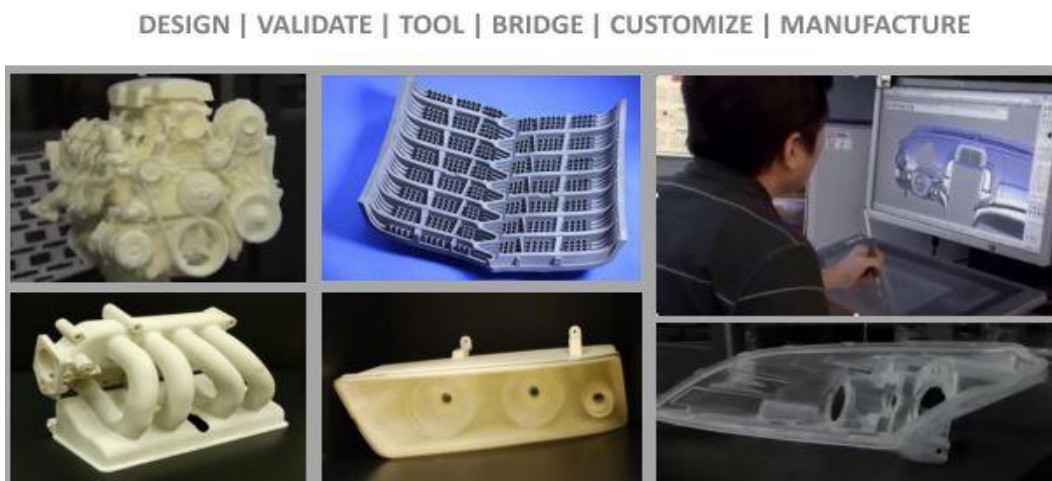


Figura 17 - Exemplos de aplicações do 3DP em veículos (3D SYSTEMS, 2015)

D – Outros

Além dos exemplos atrás referidos, existem muitos outros que demonstram a versatilidade do 3DP e o seu potencial nos diversos setores de atividade. A Figura 18, a Figura 19 e a Figura 20 apresentam vários desses exemplos, nomeadamente na educação, na engenharia de produtos (design/conceção) e na produção de bens de consumo.

EDUCATION & DIGITAL LITERACY



Figura 18 - Exemplos de aplicações do 3DP na educação (3D SYSTEMS, 2015)

DESKTOP ENGINEERING



Figura 19 - Exemplos de aplicações do 3DP na engenharia (3D SYSTEMS, 2015)

3D LIFESTYLE



Figura 20 - Exemplos de aplicações do 3DP em bens de consumo (3D SYSTEMS, 2015)

2.1.8 Players

As grandes empresas especializadas em 3DP, responsáveis pelo desenvolvimento sustentado da tecnologia e pelo fabrico dos equipamentos mais conhecidos do mercado, estão situadas em grandes potências industriais mundiais, nomeadamente na China, Estados Unidos da América, Japão, França e Alemanha, estando algumas delas localizadas em vários países simultaneamente. Essas empresas são: *Formlabs*, *3D Systems*, *Stratasys*, *B9Creator*, *Cubic Technologies*, *Optomec*, *Ultimaker*, *Fab@Home Project* (Ezeiruaku, 2015).

A nível empresarial, diversas empresas vêm utilizando o 3DP de forma a maximizarem a sua atividade. Algumas delas estão representadas na Figura 21.



Figura 21 - Empresas que já utilizaram o 3DP (3D SYSTEMS, 2015)



2.2 *Cleaner Production* (CP)

2.2.1 Sustentabilidade

Existem diversos aspetos a serem considerados durante o desenvolvimento de um produto: como o projetar, como o produzir, como o usar e como o direccionar no fim do ciclo de vida - reciclando, reutilizando ou reduzindo. As opções que se tomam relativamente a cada uma das diferentes fases do ciclo de vida de um produto terão efeito direto na sociedade e no seu modo de vida (Chen et al., 2015). A qualidade das diferentes soluções a adotar relativamente aos produtos pode ser avaliada segundo o conceito de Desenvolvimento Sustentável/Sustentabilidade.

Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades. Quando se avalia a sustentabilidade de uma solução, podem-se ter em conta diversos critérios: ambientais, económicos, sociais, tecnológicos e ao nível da sua performance específica. Contudo, é genericamente aceite que a sustentabilidade de uma solução seja avaliada segundo três grandes vertentes: ambiental, economicamente e socialmente (Elkington, 1994; Glavič & Lukman, 2007). Nos dias de hoje os aspetos económicos são os que mais pesam na tomada de decisão, quando na realidade estes três aspetos deveriam ter um peso equitativo na escolha de determinada solução. No entanto, nas últimas décadas tem-se verificado uma mudança de paradigma no setor industrial relativamente à forma como se avalia a performance de uma unidade industrial no que à fase de produção diz respeito. Se fatores como o custo, a qualidade, o tempo de entrega e a flexibilidade da produção são claramente fatores diferenciadores na competitividade de uma indústria, hoje em dia o fator sustentabilidade, alicerçado no conceito de produção mais limpa - *Cleaner Production* - tem uma relevância cada vez maior na avaliação dos resultados de uma unidade produtiva. A adoção de princípios de *Cleaner Production* (CP) parece ser cada vez mais um aspeto diferenciador. Pode-se contudo questionar a importância que a gestão de cada indústria atribui a este fator (Almeida, Agostinho, Giannetti, & Huisinigh, 2015; Salonitis & Stavropoulos, 2013). A adoção de princípios de CP leva a que alterações ao nível da gestão e da estrutura organizacional sejam necessárias, reorientando dessa forma os objetivos e metas para que as questões ambientais sejam incluídas nos modelos gerenciais e que acabem elas mesmas por serem elementos diferenciadores no mercado (Silva, Moraes, & Machado, 2015). A Figura 22

representa a evolução do paradigma industrial relativamente aos principais fatores diferenciadores no mercado.

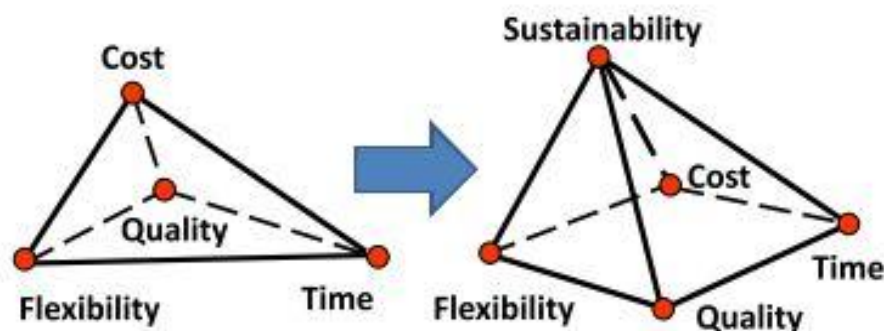


Figura 22 - Evolução do paradigma industrial face aos fatores diferenciadores (Chen et al., 2015)

Relativamente à sustentabilidade e aos seus subtemas já acima referidos, podemos medí-los segundo vários indicadores (Veleva, Hart, Greiner, & Crumbley, 2001; Veleva & Ellenbecker, 2001). Existem metodologias para seleção dos indicadores mais relevantes para o efeito, isto é, que melhor se adequem à área em análise (Bossel, 1999). Em 2007 a Comissão das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável definiu um conjunto de 96 indicadores, distribuídos por 14 temas e 44 subtemas, para cobrir todas as vertentes da sustentabilidade e assim avaliar cada uma das soluções adotadas tendo por base um *standard*, sejam elas soluções a nível macro ou micro. Contudo, a adoção destes indicadores é voluntária (United Nations, 2007).

É possível efetuar uma seleção de subtemas e indicadores que são genericamente mais utilizados para medir e avaliar o impacto da implementação de medidas de CP. Chen et al (2015) propõem os seguintes indicadores/medidas distribuídos pelas três vertentes da sustentabilidade:

- Vertente ambiental:
 - Fontes de energia – Percentagem de energia renovável utilizada;
 - Alterações climáticas – Quantidade (toneladas) de dióxido de carbono emitida;
 - Impacto na qualidade da água através da transferência de calor – Quantidade (*Watts*) de calor transferido para a água;
 - Impacto na qualidade da água através de resíduos sólidos – Quantidade (kg) de resíduos sólidos transferidos para as fontes de água adjacentes;
 - Impacto na água e no solo através da acidificação – Quantidade (kg) de componentes ácidos transferidos para a água e solo.



- Vertente económica:
 - Uso de energia – Quantidade (toneladas equivalentes de petróleo) de energia consumida;
 - Consumo de material – Quantidade (toneladas ou Kg) de matérias-primas consumidas;
 - Gestão de resíduos – Quantidade (kg por tipo) de resíduos gerados;
 - Lucros – Lucro (unidades monetárias) por produto fabricado;
 - Custos de produção – Custo (unidades monetárias) por produto fabricado.
- Vertente social:
 - Condições de trabalho – Quantidade de acidentes por ano que resultaram em lesões ou mortes;
 - Impacto na saúde a longo prazo dos colaboradores – Quantidade de lesões por ano com tratamento demorado (depressões, cancro, etc.);
 - Rotatividade dos colaboradores – Taxa a que a empresa ganha ou perde colaboradores;
 - Colaboradores permanentes – Percentagem de colaboradores efetivos;
 - Formação dos colaboradores – Quantidade de formações oferecidas aos colaboradores.

É importante referir que muitos dos aspetos acima referidos têm impacto indireto noutros, ou seja, as três vertentes acabam por ser indissociáveis. Exemplo disso é a utilização de energia, considerada neste caso como um fator de análise económica, mas que tem impacto na vertente ambiental, por exemplo quando se trata do consumo de fontes de energia não renováveis. A mesma análise poderá ser feita relativamente à gestão de resíduos e consumo de materiais.

2.2.2 Princípios de CP

O ambiente apresenta uma dinâmica própria, regenerando ecossistemas através de *inputs/outputs* de outros ecossistemas. Por outro lado, a indústria transforma as matérias-primas provenientes do meio ambiente gerando valor económico e crescimento do setor, sem que seja capaz de as repor no meio ambiente na escala e quantidade que seriam exigidas. Dessa forma, não é expectável que a manufatura se torne totalmente sustentável mas que esta adote princípios que a tornem menos agressiva para a natureza. É com este intuito que o paradigma de CP se sustenta e desenvolve (Oliveira Neto, Godinho Filho, Ganga, Naas, & Vendrametto, 2015).

CP abarca um conjunto de princípios e ferramentas com o objetivo das empresas atuarem de forma preventiva relativamente aos mais variados aspetos ambientais com vista a minimizar o



impacto associado à sua atividade, obtida à custa da melhoria dos processos, recuperação e otimização do consumo de energia e água e uso de matérias-primas. O objetivo é que as empresas obtenham ganhos ao nível da produtividade e consequente melhoria dos resultados operacionais a partir da gestão ambiental preventiva (Silva et al., 2015; Tseng, Lin, Lin, Chen, & Tan, 2014). É possível afirmar que os princípios de CP procuram essencialmente ter impacto na vertente ambiental da sustentabilidade, mas que estão naturalmente relacionados com as outras vertentes da sustentabilidade, isto é, a económica e a social.

O princípio fundamental da CP é eliminar a poluição no início e durante o processo de produção, não após, acrescentando valor aos produtos e serviços através de menor consumo de recursos energéticos e menor geração de resíduos, garantindo que a vertente ambiental está prevenida em vez de corrigida. CP, também designada por ‘prevenção da poluição’, pode ser aplicada através da modernização tecnológica, mudanças e alterações aos processos, substituição dos materiais de produção, boas práticas operacionais ou redesenho do produto (Oliveira Neto et al., 2015). Quando uma empresa tem presente várias preocupações ao nível do *Ecodesign*, que consiste em projetar produtos da forma mais ecológica possível permitindo que os mesmos sejam reciclados, reutilizados ou reduzidos, significa que os princípios de CP já foram assimilados e que fazem parte da sua cultura e gestão empresarial (Silva et al., 2015). A Tabela 2 compara o conceito de CP com o de “*End-of-pipe*”.

Tabela 2 - Comparação das soluções CP e "fim de tubo" (*End-of-Pipe*) (Institute of Environmental Engineering Kaunas University of Technology, 2000)

<i>Cleaner Production</i> (CP)	Gestão da poluição e dos resíduos
Melhoria continua	Solução individual, não integrada, para cada problema
Processos de ciclo fechado ou ciclo contínuo (encaminhamento dos resíduos gerados)	Processos de geração de resíduos (entra material, sai resíduo)
Todos têm um papel importante na implementação das medidas; <i>stakeholders</i> são importantes	Soluções são desenvolvidas isoladamente por técnicos ou por entidades externas
Antecipação ativa para evitar a poluição e os resíduos	Resposta reativa (em vez de preventiva) à poluição e geração de resíduos
Eliminação dos problemas ambientais na fonte	Poluentes são controlados através de equipamentos e métodos de tratamento de resíduos
Introduz novas práticas, atitudes e técnicas de gestão avançadas	Suporta-se em melhorias nas técnicas existentes

A Figura 23 apresenta o conceito de CP em forma de diagrama.



Figura 23 - Conceito de *Cleaner Production* (Institute of Environmental Engineering Kaunas University of Technology, 2000)

Como já referido anteriormente, o conceito de CP poderá ser aplicado segundo determinados princípios e ferramentas/metodologias. A Tabela 3 apresenta um conjunto de medidas direcionadas para a adoção de CP.



Tabela 3 - Princípios e ferramentas de *Cleaner Production* (Oliveira Neto et al., 2015)

1 – Planejamento e controle da produção com educação ambiental	16 – Procedimento de avaliação do ciclo de vida na concepção do produto
2 – Definição com o cliente dos atributos importantes para o projeto e/ou promover a mudança nos produtos existentes, procurando minimizar o impacto ambiental	17 – Análise de risco ambiental do produto e da produção
3 – Projeto do produto procurando o uso de materiais ecológicos (<i>ecodesign</i>)	18 – Prevenção da poluição
4 – Projeto do produto com vista à reciclagem, reuso ou redução	19 – Projeto das redes logísticas especializadas
5 – Projeto do processo produtivo ecoeficiente	20 – Ecologia industrial (utilização de empresas em <i>clusters</i> – ‘ <i>ecorrede</i> ’ empresarial)
6 – Auditoria e controle da poluição na produção	21 – Indicador de investimento em treino sobre educação ambiental na produção
7 – Investimento em pesquisa e inovação sobre práticas de sustentabilidade na produção	22 – Indicador de custo operacional devido à compra de produtos com selo verde
8 – Desenvolvimento com os fornecedores de matérias-primas e componentes ecológicos	23 – Processo de avaliação do desempenho ambiental
9 – Utilização de critérios qualificadores relativamente à compra e seleção de fornecedores sustentáveis	24 – Utilização de métodos de desdobramento do desempenho ambiental de uma organização e utilização de KPI's
10 – Auditoria ambiental aos fornecedores	25 – Implementação de CP e auditorias para avaliar se o plano de ações está a ser cumprido
11 – Utilização de embalagens ecológicas nos produtos para redução do impacto ambiental	26 – Tecnologia de informação na cadeia de abastecimento “Verde”
12 – Consideração de questões ambientais na gestão da cadeia de abastecimento	27 – Existência de sistema de gestão ambiental certificado ISO 14001
13 – Logística inversa no fim de vida do produto para reciclagem, reuso ou redução	28 – Existência de norma de rotulagem ambiental nos produtos fabricados
14 – Redução dos riscos ambientais externos à organização através do controle de resíduos e emissões na produção	29 – Existência de norma que trata da inclusão dos <i>stakeholders</i> nas decisões operacionais
15 – Método de avaliação do fator de intensidade de materiais para minimizar e controlar a produção e a emissão de resíduos	30 – Implementar tecnologias mais limpas nos sistemas produtivos



De acordo com o Institute of Environmental Engineering Kaunas University of Technology (2000), as práticas de CP podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

1. **Manutenção da limpeza e arrumação** (*Housekeeping*) de forma a evitar derramamentos e vazamentos;
2. **Substituição das matérias-primas** por outras menos tóxicas, renováveis ou outras com um tempo de vida superior;
3. **Melhor controlo do processo**, alterando os procedimentos operacionais e instruções de equipamento;
4. **Modificação dos equipamentos** para que se tornem mais eficientes e produzam e emitam menos resíduos;
5. **Alteração de tecnologia**, utilizando eventualmente o 3DP como solução alternativa aos métodos tradicionais de produção;
6. **Reutilização/recuperação *in situ*** dos resíduos gerados através do próprio processo;
7. **Alterações ao produto** de forma a minimizar os impactos ambientais resultantes da sua própria produção, do seu uso e fim de vida;
8. **Uso eficiente da energia**, utilizando fontes de energia renováveis ou reduzindo consumos.

A aplicação dos princípios e ferramentas/metodologias acima referidos pode ter impacto em 7 categorias diferentes (Oliveira Neto et al., 2015):

1. Redução e não geração de emissões e resíduos;
2. Eficiência/substituição do uso de matérias-primas;
3. Eficiência do uso da água;
4. Eficiência do uso de energia;
5. Reciclagem/reutilização de resíduos e emissões;
6. Benefícios ambientais e económicos;
7. Benefícios de saúde ocupacional e segurança no trabalho.

Apesar de a aplicação de princípios de CP estar quase sempre associada à atividade empresarial, alguns autores afirmam que para que os princípios de CP sejam implementados e introduzidos no quotidiano das pessoas e empresas, é necessário o envolvimento de governos ou

de organizações designadas para o efeito. Contudo, cada uma das indústrias individualmente abrangidas, é naturalmente responsável pela implementação das suas próprias medidas de CP para que num futuro próximo a sustentabilidade esteja garantida (Almeida et al., 2015).

É assim possível definir diferentes níveis de ação com impactos naturalmente diferentes. O âmbito de aplicação e natureza dos princípios e ferramentas de CP, assim como as suas respetivas características podem ser divididos em quatro níveis (global, nacional, setorial ou individual), conforme ilustrado na Figura 24 e distinguem-se nomeadamente quanto à complexidade, frequência de aplicação, área de influência e da complexidade da informação. A adoção de medidas de CP a um nível micro (empresas) acaba por ser mais simples e frequente relativamente à adoção de medidas de CP a um nível macro, pois estas envolvem organizações e governos onde é necessária a cooperação entre todos, acabando por dar origem a medidas extremamente complexas.

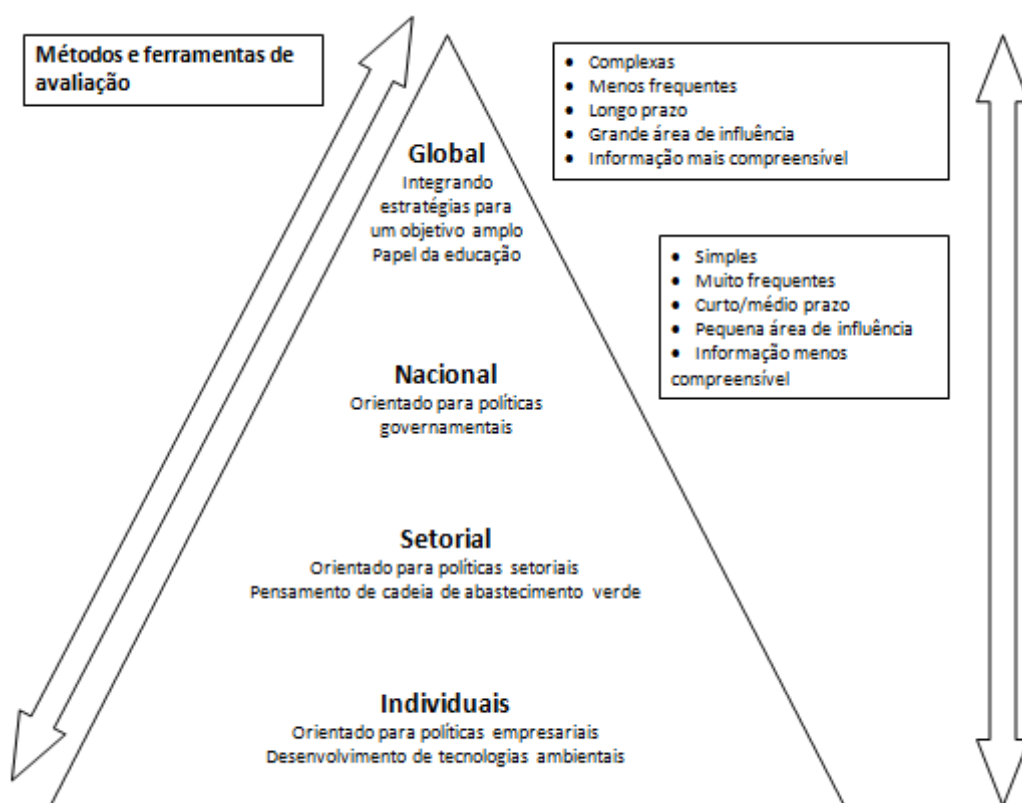


Figura 24 - Pirâmide das medidas de CP (Almeida et al., 2015)

A pirâmide acima representada permite também situar cada uma das medidas ou estratégias de CP utilizadas, isto é, posicioná-las segundo o tempo e escala de abrangência. Com isto pretende-se dizer que algumas estratégias, apesar de importantes, têm uma pequena área de



influência e efeito apenas num curto período de tempo e com isso, necessitam de um acompanhamento e monitorização mais apertado para dessa forma ser possível implementar medidas corretivas e garantir que os *standards* se mantêm. Este é o caso das estratégias situadas na parte inferior da pirâmide, de âmbito individual/empresarial. Por outro lado, as medidas situadas na parte superior da pirâmide necessitam de um maior volume e mais complexa informação, contudo o seu impacto irá abranger uma área grande e ao longo de um grande período de tempo.

2.2.3 A adoção de CP e a performance

Embora atualmente se considere que CP traga benefícios para uma organização, é importante que esses dados sejam mensuráveis, nomeadamente ao nível da riqueza gerada. Um estudo executado a empresas produtoras Chinesas (Zeng, Meng, Yin, Tam, & Sun, 2010) demonstrou que existe uma correlação positiva entre a adoção de princípios de CP e a performance da organização.

A adoção de CP pode ser atingida através de medidas de baixo custo que requerem um investimento de capital relativamente baixo, como por exemplo: a consciencialização dos colaboradores para as questões ambientais; a melhoria das condições de trabalho para reduzir o desperdício; a implementação com rigor de regras de CP; a implementação de CP como uma política de longo termo; o aumento da reciclabilidade de produtos e componentes; e a redução do tamanho das embalagens. Medidas que exigem investimentos elevados são por exemplo: redesenho do processo produtivo; utilização de energia e tecnologias limpas; instalação de equipamentos mais modernos e eficientes; alteração das matérias-primas utilizadas; aumento da durabilidade dos produtos e aumento do investimento na proteção ambiental. O segundo grupo de medidas exige uma alteração importante na estrutura da empresa e como ela se comporta no seu dia-a-dia.

A avaliação da performance de uma empresa, face à adoção dos princípios de CP, pode ser definida segundo índices financeiros ou não financeiros. No grupo dos índices financeiros podem-se avaliar as seguintes vertentes (devido à adoção de CP):

- Rentabilidade (os consumidores estão dispostos a pagar um preço mais elevado ou o custo de produção baixou);
- Taxa de lucro líquido;



- Retorno sobre o capital próprio.

No grupo dos índices não financeiros pode-se avaliar:

- Cota de mercado;
- Reputação da organização;
- Confiança dos acionistas.

Mais pormenorizadamente, o estudo de Zeng et al. (2010) afirma que as medidas *low-cost* têm um maior impacto nos índices financeiros comparativamente aos índices não financeiros. Por outro lado, as medidas mais caras têm uma maior contribuição para os índices não financeiros. Isto significa que as medidas mais baratas têm um impacto mais rápido apesar de mais minimalistas, facto que vai de encontro à filosofia de melhoria contínua. Um exemplo claro desta situação é que por exemplo, o uso de energia e tecnologias mais limpas requer um esforço financeiro significativo mas não resulta em benefícios económicos imediatos (medidas de longo prazo).

As tecnologias/medidas de CP são assim essenciais para os principais processos de produção pois são um meio de reduzir custos operacionais. Os mais recentes desenvolvimentos em “química verde”, “engenharia verde” e “materiais sustentáveis” oferecem oportunidades para novos materiais e materiais intermédios, alternativas de reuso de materiais, redução das emissões e produção baseada em materiais renováveis (Almeida et al., 2015).

3. 3DP COMO *CLEANER PRODUCTION*

3.1 A evolução do paradigma produtivo e da procura

A evolução dos paradigmas de produção relaciona-se, pelo menos em parte, com o surgimento de novas tecnologias de produção (Chen et al., 2015) e novos métodos de organização do trabalho. Estes avanços procuram atingir níveis superiores de adequação à procura, através da melhoria da qualidade, do custo, ou simplesmente do nível de personalização dos produtos. A Figura 25 apresenta uma representação da sucessão de quatro paradigmas principais, desde a produção artesanal à manufatura digital.

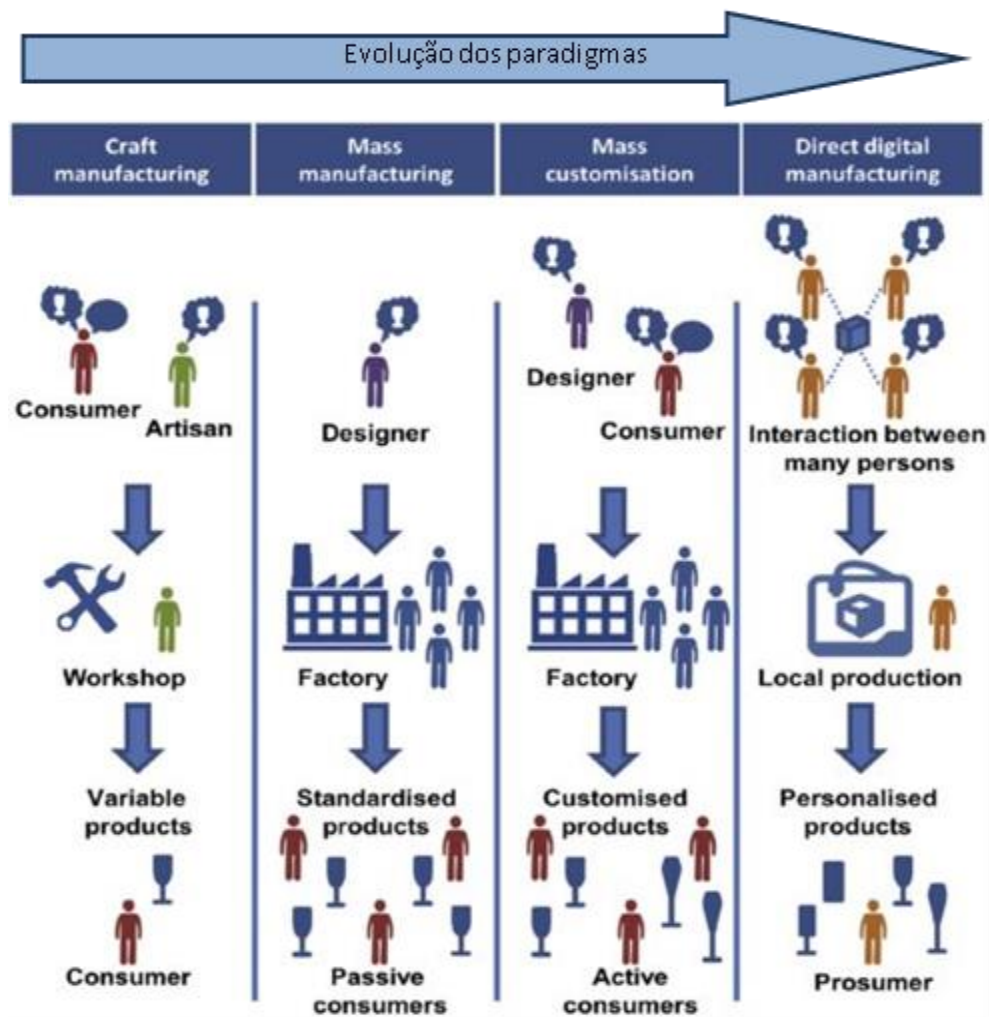


Figura 25 - Evolução do paradigma produtivo (adaptado de (Chen et al., 2015))



Os princípios que deram origem ao conceito de *Mass Customization* (Customização em Massa) estão a induzir o consumidor final a possuir a capacidade e habilidade de fabricar na sua própria casa o que pretende. É aqui que surge o 3DP (ou AM como já explicado) como solução para corresponder a esta necessidade. O 3DP tem a capacidade de combinar as vantagens dos paradigmas anteriores (baixo custo da produção em massa) e ainda a capacidade de produzir produtos personalizados de qualidade com tamanho de lote unitário, isto é, produzir apenas uma unidade personalizada ao consumidor final (Chen et al., 2015). É apresentado na Tabela 4 um resumo dos diferentes paradigmas produtivos no que ao *design* e à produção diz respeito.

Tabela 4 - Resumo dos paradigmas produtivos (Chen et al., 2015)

Design e Produção	Produção artesanal	Produção em massa	Customização em massa	Manufatura Direta Digital
Quem?	Artesão	<i>Designers</i> e especialistas	<i>Designers</i> e especialistas	Rede de pessoas
Como?	Baseado na experiência	Baseado no projeto	Baseado no projeto	Cria ou efetua o <i>download</i> do projeto
Onde?	Oficina	Fábrica	Fábrica	Máquina de 3DP
O quê?	Produtos variáveis	Produtos <i>standard</i> , com alta qualidade	Produtos <i>standard</i> , com alta qualidade e variantes predefinidas	Produtos personalizados e variáveis
Quantos?	Lote unitário	Grandes lotes	Pequenos lotes	Lote unitário
Para quem?	Consumidor (poucos)	Consumidores passivos	Consumidores ativos	Prosumidor (em rede ou individualmente)

Conforme demonstrado na última coluna da Tabela 4, o paradigma mais recente (Manufatura Direta Digital) permite que seja o próprio consumidor o responsável pelo fabrico do produto (prosumidor), considerando que está dotado de equipamento (máquina de 3DP) e conhecimento para tal. É assim notório que o 3DP é também uma resposta tecnológica às alterações de paradigma produtivo e das necessidades do mundo atual (Rayna & Striukova, 2014).

Uma das questões que se coloca é se o 3DP será capaz de competir com os processos tradicionais quando o volume a produzir aumentar, ou seja, se o 3DP poderá substituir os processos atuais de produção. Segundo Neil Hopkinson (The Economist, 2011) o 3DP será capaz de competir com a produção em massa, surgindo cada vez mais nas linhas de produção em substituição de equipamentos como fresas, prensas, fundições e injeção de plástico. Mesmo que



durante a produção não exiba a mesma performance que os equipamentos *standard*, trará sempre vantagens no que ao *design* do produto diz respeito e na rapidez com que o produto é libertado para produção, segundo a organização *Morris Technologies* (The Economist, 2011).

A introdução desta tecnologia no quotidiano das pessoas e no mundo empresarial, irá originar alterações não só na produtividade do sistema, mas também no ambiente e na sociedade em geral. É precisamente esse impacto que agora se procura investigar, ou seja, se 3DP pode ser considerada uma tecnologia que contribui positivamente para o desenvolvimento de CP. Ainda assim e numa análise prévia, a Tabela 5 refere alguns dos pontos identificados por diversos autores que serão alterados com a entrada do 3DP no quotidiano das populações.

Tabela 5 - Impacto do 3DP (adaptado de (Campbell et al., 2012))

Tópico	Comentário
Cadeias de abastecimento	Produtos com milhares de componentes poderão ser obtidos de uma forma mais rápida, eliminado diversos intermediários das cadeias de abastecimento.
<i>Design</i>	O <i>design</i> /estudo de um produto poderá ser facilmente partilhado em qualquer parte com recurso à <i>Internet</i> . Dessa forma, populações mais remotas terão o acesso mais facilitado a produtos projetados noutras partes do globo.
Produção	A produção " <i>on demand</i> " estará facilitada, reduzindo dessa forma a necessidade de criação de <i>stocks</i> ou de armazenagem de peças sobressalentes (<i>spare parts</i>).
Rapidez do <i>Output</i>	Uma fábrica será capaz de produzir diferentes produtos com características muito próprias (customização), sem necessidade de grandes gastos com <i>changeovers</i> (trocas de produto).
Distribuição	Com a produção disponibilizada ao consumidor, a necessidade de cadeias de distribuição é minimizada e até eliminada para determinados produtos.
Importações/exportações	Com a produção disponibilizada para o consumidor, a necessidade de importação será minimizada para os países com menor capacidade de produção do bem, assim como as exportações dos países com maior capacidade produtiva.
Pegada ecológica	A pegada ecológica será minimizada devido à redução das emissões de carbono obtidas à custa da redução no transporte de materiais assim como do consumo energético necessário para a produção dos mesmos.
Mão-de-obra	A necessidade de mão de obra especializada irá aumentar, contudo o rácio de pessoa – máquina irá diminuir (mais máquinas para as mesmas pessoas). Em algumas economias isso será positivo como é o caso dos países em envelhecimento.



3.2 Análise qualitativa

Com o desenvolvimento da tecnologia e o crescente interesse do Mundo tecnológico pela mesma, diversas opiniões vão sendo formadas pelos técnicos e investigadores que se dedicam ao estudo e desenvolvimento de assuntos relacionados com o 3DP. É comum os especialistas basearem-se naquilo que esperam que esta tecnologia venha a introduzir no mundo industrial, sustentados pela sua larga experiência e conhecimento técnico.

No Congresso Internacional de Fabricação Sólida de Livre Formato realizado em 2008 (Bourell et al., 2009) todas as questões relacionadas com o 3DP foram analisadas. Uma das mais ponderadas pelos diversos especialistas estava relacionada com a sustentabilidade ambiental da tecnologia, isto é, se de facto o 3DP se adequa aos princípios de CP e sustentabilidade. O objetivo deste congresso foi o de desenvolver um guião para a área de 3DP para os 10 a 12 anos seguintes (até 2020 aproximadamente).

Segundo as considerações de Jawahir nesse congresso, apesar do grande avanço tecnológico que se vinha a assistir, com o surgimento de novas técnicas e materiais, pouco teria sido executado no desenvolvimento dos princípios de sustentabilidade e práticas benéficas para o ambiente. Realça até que a eficiência energética do 3DP à época, seria inferior à dos processos tradicionais, segundo estudo do MIT, apesar da diminuição da geração de resíduos do 3DP. Contudo esta situação tem-se alterado. No mesmo congresso e relativamente à vertente da energia, F. Liou afirma que o 3DP poderá contribuir de forma relevante ao produzir equipamento/ferramentas que contribuam para a produção de energia renovável. Tem também o potencial de contribuir para o desenvolvimento integrado de produtos e processos, aumentando a rapidez com que o *output* é gerado, diminuindo o custo global. Relativamente à vertente da sustentabilidade, o 3DP pode contribuir fortemente para o reuso ou reprodução de peças ou produtos já existentes (reparação/substituição rápida de componentes), reduzindo dessa forma novos consumos de materiais e de energia durante a sua produção. Como consequência irá existir a poupança da compra dessas mesmas novas partes ou produtos.

A opinião de Lyons (Bourell et al., 2009) é que o 3DP, através da representação do produto (protótipo), permitirá a descrição completa do mesmo ao longo do seu ciclo de vida (*design*, produção e fim de vida). Esta descrição incluirá indicadores de produção sustentável que suportarão as decisões da engenharia ao longo das diversas fases do ciclo de vida do produto. Permitirá também uma maior versatilidade/flexibilidade produtiva (customização). Segundo



Mazumber da Universidade de Michigan (Bourell et al., 2009) e visto que a indústria é responsável por 33% da pegada ecológica, a tecnologia de 3DP pode ser usada de forma a reduzir a energia consumida e consequentemente levar a uma redução desse efeito.

Argumentos claros são referidos por P. Reeves (Bourell et al., 2009) relativamente ao uso do 3DP como forma de resposta às questões de sustentabilidade ambiental que os processos tradicionais de fabrico não conseguem acompanhar. Alguns desses argumentos são:

- Uso eficiente de matérias-primas, utilizando pó e líquidos em alternativa aos materiais sólidos que exigem desbaste e consequentemente desperdício;
- Uso eficiente de energia, substituindo processos de elevadas necessidades energéticas;
- Redução das emissões de carbono devido à diminuição do consumo de combustíveis, relacionado com a possibilidade do produto ser fabricado em qualquer localização geográfica perto do consumidor final, eliminando assim o transporte associado, e/ou devido ao facto de se fabricarem peças mais leves e mais fáceis de transportar.

T. Wohlers (Bourell et al., 2009), conceituado especialista sobre AM, refere que apesar de à época existirem poucos estudos sobre os benefícios ambientais do 3DP, nomeadamente a redução do consumo de energia e das emissões de carbono, é expectável que essas constatações surjam pois o 3DP permite uma redução das necessidades de materiais assim como a produção de peças mais leves.

No artigo disponibilizado por Campbell et al (2012), são apontados variados fatores sobre os quais o 3DP terá impacto e trará modificações. Naturalmente, a vertente ambiental é uma das que mais relevância tem, e nesse sentido são apresentados na Tabela 6 diversos pontos que comparam o 3DP face aos métodos tradicionais de fabrico relativamente aos princípios de CP.



Tabela 6 - 3DP vs métodos tradicionais, segundo princípios de CP (Campbell et al., 2012)

Positivo	Negativo
<ul style="list-style-type: none">• Reduz o desperdício de material;• Limita a quantidade de energia consumida (tendo por base a eliminação de diversos componentes);• Uso mais eficiente de matérias-primas;• Diminuição do desperdício associado à criação de <i>stocks</i> e sobressalentes;• Minimiza a utilização de produtos químicos agressivos;• Possibilidade de <i>design</i> dos produtos de forma compatível com o ambiente (<i>Eco design</i>);• Alterações de <i>design</i> racionalizadas;• Redução dos resíduos emitidos;• Redução da necessidade de transporte (eliminação de diversos participantes nas cadeias de abastecimento).	<ul style="list-style-type: none">• Conseguirá utilizar materiais recicláveis?• Que tipo de comportamento apresenta face ao uso de Nano materiais relativamente ao ambiente, saúde e segurança?

Segundo este mesmo artigo, o 3DP poderá minimizar alguns dos problemas ambientais urgentes com que a comunidade internacional e o Mundo lidam atualmente. A pegada de carbono gerada pelo produto será minimizada através da eliminação das cadeias de abastecimento complexas que atualmente contam com dezenas ou centenas de fornecedores. Além disso, dependendo da complexidade, do número de componentes do produto e das matérias-primas envolvidas, a energia total consumida poderá também ser reduzida (Campbell et al., 2012). Outro ponto a favor do 3DP está relacionado com a eliminação de *stocks* e o custo associado (*stocks* estão identificados como um dos 7 desperdícios *Lean*).

Estudo semelhante foi desenvolvido por Chen et al. (2015), onde são referidos diversos pontos sobre os quais o 3DP terá impacto/implicações (positivo ou negativo). A Tabela 7 apresenta esses dados, sendo que como já referido anteriormente, alguns dos pontos associados à vertente económica têm naturalmente impacto na vertente ambiental da sustentabilidade e vice-versa.



Tabela 7 - Implicações do 3DP, segundo vertente ambiental / económica (Chen et al., 2015)

Ambiental / Económica
<ul style="list-style-type: none">• Maior % de utilização das matérias-primas (+)• Cadeias de abastecimento mais simples, com menos preocupações de transporte (+)• Descentralização da produção, reduzindo o impacto do transporte (+)• Menor desperdício de material e energia devido a stocks/existências menores (+)• Menor geração de resíduos (ou melhor gestão dos mesmos) (+)• Produção orientada para o utilizador, próxima do local de consumo, diminuindo a necessidade de <i>stocks</i> e consequentemente as necessidades de matérias-primas e de energia (+)• Uso de menor número e menos ferramentas complexas para processamento (ex. moldes), originando ganhos de matéria-prima e de energia (+)• Produção mais lenta (-)• Maior necessidades de energia em produção em massa (-)• Problemas de qualidade ainda não estão totalmente solucionados, existindo o risco de peças com defeito e necessidade de Rework (-)• Estudos ambientais relativamente ao seu impacto ambiental ou ecoeficiência (+ / -)

Segundo Chen et al. (2015), relativamente aos pontos da Tabela 7, é possível afirmar-se que o 3DP é competitivo (comparativamente à injeção em moldes) para um volume elevado de produção mista, isto é, para equipamentos onde se produza mais do que um tipo de produto (*mix* de produtos elevado). O 3DP pode reduzir a pegada de carbono (ecológica) através da redução de matérias-primas; da intensidade energética e desperdício de energia (existente noutros processos: fundição) e consumo de combustível no transporte do produto. Auxilia também na redução de emissões poluentes e energia consumida para produção de ferramentas valiosas, através da minimização da energia consumida para baixos rácios de volume sólido face ao volume total, comparativamente a outros processos de fabrico.

Um aspeto interessante do 3DP está relacionado com o volume sólido (interior) do produto, isto é, o 3DP consegue minimizar o consumo de energia para baixos rácios de volume sólido relativamente ao CNC (baixos rácios de volume sólido significam que o volume sólido final é muito inferior ao volume original da peça, isto é, no caso da utilização do CNC é necessário muito desgaste pela máquina).

Segundo Cotteleer (2014), o impacto do 3PD pode ser avaliado segundo duas vertentes: relativamente aos produtos e à cadeia de abastecimento associada. Relativamente à primeira



vertente, permitirá a customização face aos requisitos do cliente; aumento da funcionalidade e performance do produto e também a eliminação dos custos associados ao aumento da complexidade do produto. Segundo a vertente da cadeia de abastecimento, permitirá a aproximação da produção do ponto de consumo, aumento da capacidade de resposta e flexibilidade do sistema de abastecimento, facilidade na gestão da incerteza na procura e a redução da necessidade de inventários. O impacto nestas duas vertentes traduzir-se-á em benefícios nas diversas fases da cadeia de valor de um produto relacionadas com a vertente ambiental da sustentabilidade (Cotteleer, 2014):

- *Design*: desenvolvimento do produto mais rápido e com menos constrangimentos (maior impacto na vertente social);
- *Produção*: redução/eliminação de ferramentas (processo menos manual) e com menos processos (menos montagem), diminuição do desperdício de materiais e produção face à necessidade;
- *Transporte e distribuição*: produção próxima do local de consumo diminuindo a logística associada à distribuição e os gastos associados;
- *Suporte*: Possibilidade de distribuição de produtos eletronicamente, permitindo a democratização da produção (maior impacto na vertente social).

Estão assim reunidos um conjunto de pontos que são apontados pelos especialistas no setor como sendo aqueles em que o 3DP terá maior influência à medida que for sendo introduzido no quotidiano das pessoas e das indústrias.

3.3 Análise quantitativa

Apesar da apresentação da opinião do mundo sobre a tecnologia de 3DP, é também importante apresentar dados mensuráveis que justifiquem o potencial da mesma.

No estudo apresentado por Chen et al. (2015) procurou-se comparar o ciclo de vida de um produto plástico ao nível do consumo energético quando fabricado através da técnica de SLS e através da injeção em moldes (IM, correspondente ao paradigma de *Mass Production*). Esta análise suportou-se noutros estudos, conforme se pode verificar pela Figura 26.

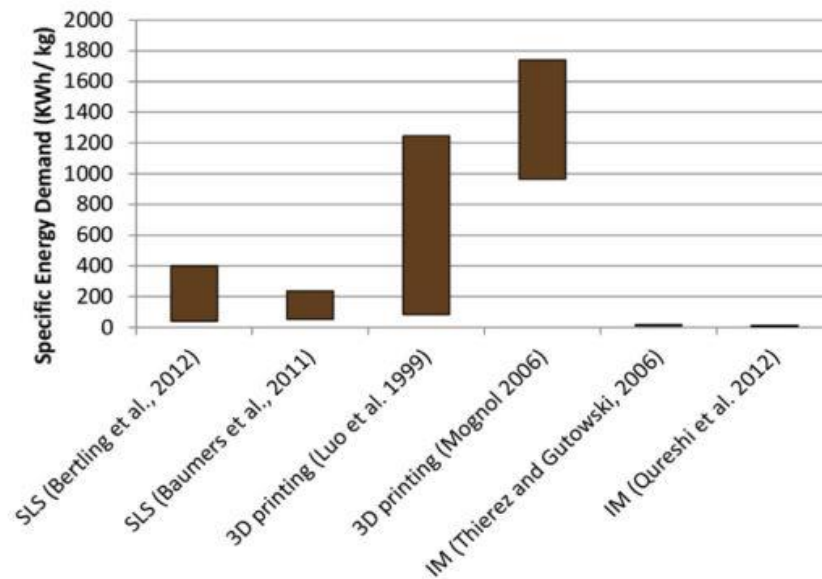


Figura 26 - Consumo energético do 3DP vs Injeção em moldes (Chen et al., 2015)

Deste estudo é possível verificar que o consumo energético na fase de produção efetiva, medido através da energia consumida por Kg fabricado (KWh/Kg), está relacionado com o tempo de processo em cada uma das técnicas utilizadas, sendo o fator que mais relevância tem comparativamente a outros, como o tipo de máquina utilizada ou as características do processo em si. A técnica de SLS (3DP) apresentou maiores necessidades energéticas face à IM, sendo as necessidades ainda maiores quando se utiliza a técnica de 3DP. Contudo, as duas técnicas de 3DP analisadas apresentam comportamento semelhante. Ainda relativamente a este estudo, o tempo de processo da IM é curto mas necessita de uma energia muito superior por unidade de tempo relativamente aos processos de 3DP, que têm necessidades energéticas globais superiores devido ao facto dos seus processos serem muito mais demorados do que os da IM, conforme se pode analisar pela Figura 27. Isto torna ainda mais evidente o peso do tempo de processamento, conforme referido anteriormente (Chen et al., 2015). Dessa forma é possível concluir que o tempo de processamento elevado acaba por retirar competitividade ao 3DP pois as necessidades energéticas por unidade de tempo na fase de produção são menores no 3DP comparativamente à IM.

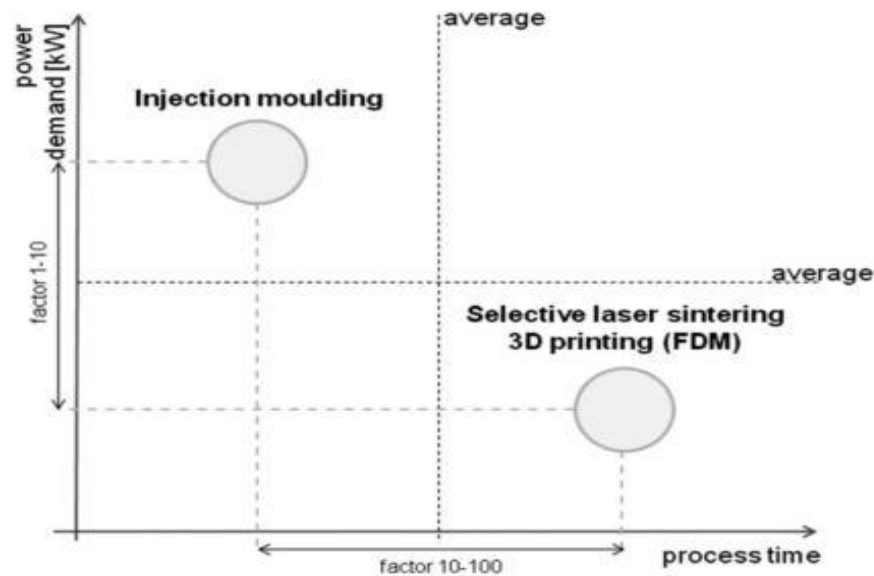


Figura 27 - Consumo energético vs tempo de processamento (Chen et al., 2015)

Contudo, outros fatores devem ser considerados além do consumo energético na produção efetiva, ou seja, consumos energéticos relacionados com outras fases do ciclo de vida do produto ou indiretamente relacionados com a produção. Os fatores analisados, sempre do ponto de vista do consumo energético, foram: uso de matéria-prima; necessidade de ferramentas; complexidade da forma, processo de fabrico e transporte. Os resultados dessa análise estão representados na Figura 28, considerando que:

- Uso de matéria-prima: importante na medida em que do ponto de vista do consumo energético se mais matéria-prima for processada relativamente ao necessário (refugo), mais desperdício energético se estará a gerar. O mesmo se aplica à reciclagem do material não utilizado;
- Necessidade de ferramentas: a necessidade de utilização de ferramentas nos processos tradicionais e o gasto energético para o seu fabrico, faz com que as necessidades energéticas do produto obtido através das mesmas aumentem indiretamente;
- Complexidade e individualidade das peças: o facto de o 3DP permitir a integração de vários processos num só torna-o mais competitivo;
- Cadeia de abastecimento e transporte: promovendo a passagem da responsabilidade de produção para o consumidor, os gastos energéticos com o transporte e abastecimento serão claramente inferiores.

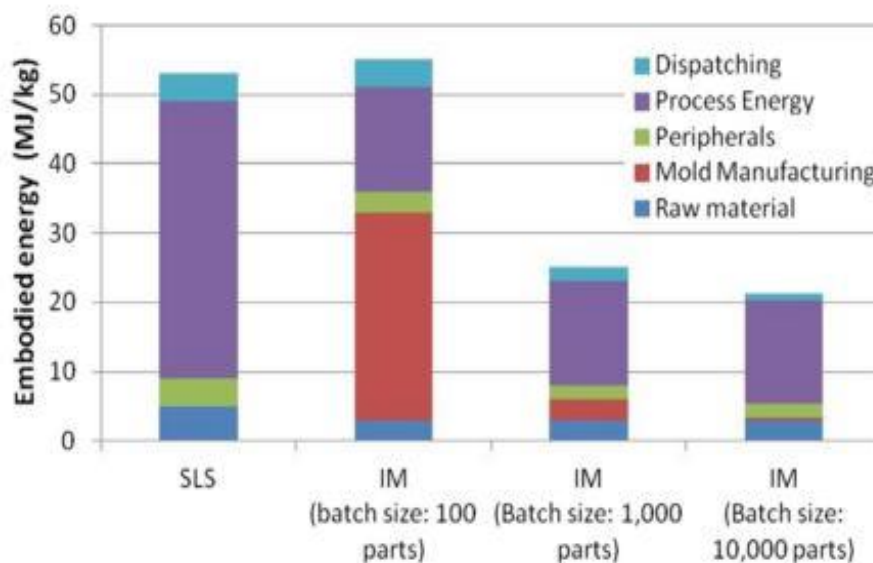


Figura 28 - Consumo energético nas várias fases de vida do produto (Chen et al., 2015)

Da análise do gráfico, conclui-se que a técnica de SLS (3DP) é competitiva face à IM para um volume de aproximadamente 100 unidades, ou seja, para um *batch size* pequeno. A partir dessa quantidade perde competitividade, ou seja, não há economia de escala relativamente ao consumo energético, sendo o principal motivo a diluição dos custos da necessidade de ferramentas/moldes pelo *batch size*. Contudo, e tendo em conta que uma das características deste paradigma produtivo mais recente é permitir a máxima personalização por parte do consumidor final, relativamente ao consumo energético esta solução é bastante prometedora (Chen et al., 2015), ainda mais quando o tempo de processamento foi diminuído.

Esta mesma situação verifica-se na Figura 29, com o 3DP a perder competitividade à medida que o *batch size* é superior. Da análise da figura retira-se que para a produção de pequenas quantidades através da injeção de plástico o peso do custo das ferramentas (*tooling*-uso de moldes) é extremamente elevado, situação que não se verifica no 3DP pois não são necessárias ferramentas adicionais. Por outro lado, no 3DP o peso do custo dos materiais é superior.

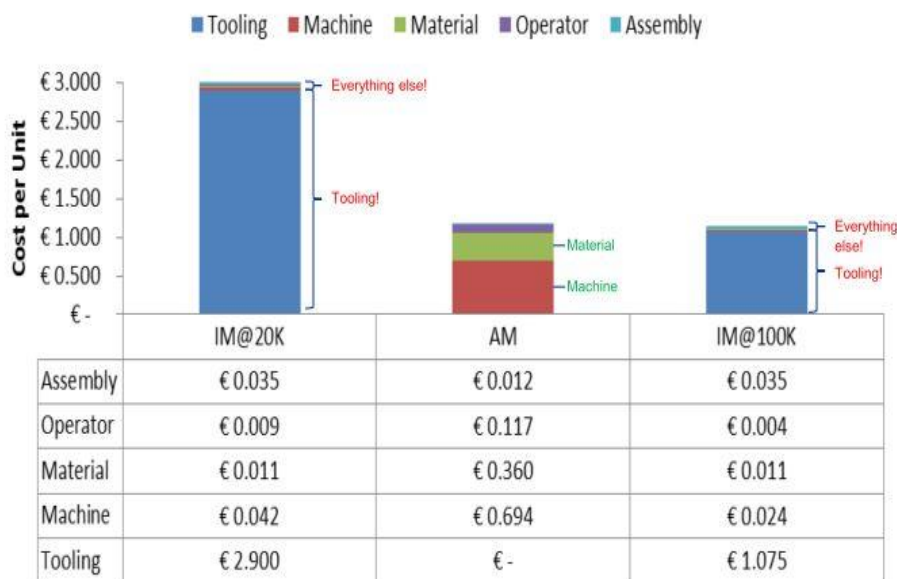


Figura 29 - Custos do 3DP vs Injeção de plástico (Cotteleer, 2014)

Segundo Neil Hopkinson (The Economist, 2011), o 3DP já apresentava competitividade relativamente à injeção de plástico para volumes de sensivelmente 1000 unidades. Seria expectável que nos próximos 5 anos (até sensivelmente 2017), o 3DP já fosse competitivo para volumes de dezenas de milhares.



4. 3DP COMO TECNOLOGIA DISRUPTIVA

À semelhança do verificado relativamente à vertente ambiental da sustentabilidade, diversas características do 3DP são indicadas como potenciais alteradoras de como o Mundo em geral se comporta, ou seja, capazes de influenciar a vertente social da sustentabilidade. Muita dessa análise é efetuada pela bibliografia em paralelo com a vertente ambiental sendo contudo, separada nesta dissertação por não ser o principal foco de análise.

4.1 Impacto na vertente social

Segundo P. Reeves (Bourell et al., 2009) o 3DP permitirá que o produto seja fabricado em qualquer localização geográfica, perto do consumidor final, reduzindo a necessidade de transporte (com impacto na vertente ambiental pois as emissões de carbono são reduzidas). Isto permitirá que zonas mais remotas e com acesso a uma menor quantidade de recursos naturais acabem por ter acesso praticamente aos mesmos produtos (e oportunidades) que outras. Poderá de alguma forma aplicar equidade ao Mundo.

Chen et al. (2015) refere esse mesmo fator como impulsionador do 3DP. Deverá ocorrer a descentralização da produção, garantindo o abastecimento de comunidades mais remotas devido à proximidade com o consumidor final (democratização da produção), proporcionando iguais oportunidades para todos os participantes no mercado e na sociedade. Relativamente ao processo de *design*, o 3DP permitirá o acesso dos utilizadores a uma comunidade global onde o processo de *design* será tendencialmente rápido, permitindo uma redução do tempo de desenvolvimento do produto e tornando as cadeias de abastecimento menos importantes, focalizando-se nas matérias-primas utilizadas. A Figura 30 reflete precisamente esse ponto.

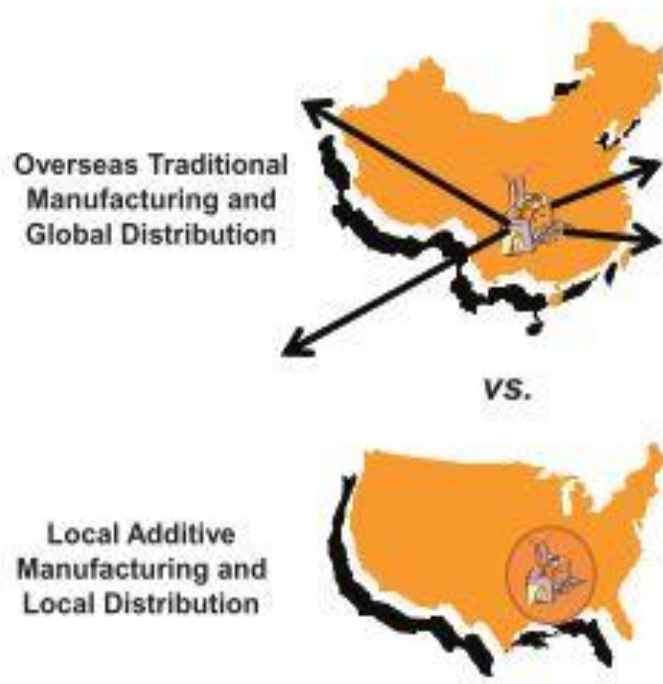


Figura 30 - Descentralização da produção com recurso ao 3DP (Campbell et al., 2012)

No contexto do referido na página anterior, suportado pela Figura 30, é nítido que a introdução do 3DP na produção de bens provocará uma alteração profunda na forma como o mundo industrial se comporta. As potenciais vantagens são, segundo Campbell et al. (2012):

- Produção mais próxima do consumidor;
- Transações de *design* em vez de produtos;
- Produção com a necessidade, não existindo necessidade de criar inventários;
- Criação de uma nova indústria especializada no *design* de produtos;
- Criação de uma nova indústria de produção de impressoras 3D e de materiais necessários à produção.

Outro aspeto interessante é que o 3DP apresenta relevância para fins de pesquisa e ensino, e dependendo da abertura do sistema e da sua estrutura, a introdução em países em desenvolvimento é encarada como inovação acessível, isto é, *hardware* livre capaz de colmatar as lacunas tecnológicas, educacionais e culturais entre os países em desenvolvimento e desenvolvidos. À medida que os custos dos sistemas de 3DP vão baixando e pela facilidade com que cada vez mais é possível obter formação adequada sobre o assunto, as barreiras para a entrada no conjunto de pessoas que são ativas na criação de produtos através do 3DP são



diminuídas. Este é mesmo um fator crítico do 3DP pois quando se conseguir juntar um grande grupo de contribuidores e a maturação tecnológica for atingida, o resultado será naturalmente o aumento da qualidade do *output* dos produtos gerados por 3DP.

Além dos pontos já referidos, o 3DP terá benefícios para a saúde quando comparado com os processos convencionais, na medida em que evita a exposição a longo prazo a ruídos e gases dos processos tradicionais de produção (Campbell et al., 2012; Chen et al., 2015).

Contudo nem tudo é positivo. Atualmente, o 3DP tem ainda problemas por resolver como as regras de certificação (controlo de patentes e a proteção de dados) quando a produção se tornar democratizada, como os problemas de qualidade devido às baixas resoluções, assim como o tipo de materiais utilizados. Os processos também necessitam de ser melhorados ao nível da sua eficiência (Chen et al., 2015). Ainda negativamente, o facto de o 3DP permitir o fabrico de qualquer produto de forma muito fácil, pode levar a que o consumo de material seja superior ao necessário pois muitos objetos vão ser fabricados sem ter uma utilidade definida (impressão de produtos puramente lúdica).

Outros aspetos sociais a serem analisados são a perda de trabalhos e a segurança. Relativamente ao primeiro ponto, segundo o estudo de McCutcheon et al. (2014) conclui-se que alterações nos processos produtivos com a introdução do 3DP poderão também originar alterações nas necessidades de pessoal das empresas. Este ponto é justificado pela necessidade de *know-how* especializado, que poderá ser (ou não) treinado, ou seja, serão necessárias características/habilidades diferentes das que a manufatura tradicional está habituada. Há também o risco de muitos dos trabalhos manuais e de montagem serem eliminados, ou pelo menos diminuídos pois será possível fabricar produtos cada vez mais complexos e com menores necessidades de montagem. Assim, do ponto de vista empresarial existirá poupança, mas do ponto de vista social será algo negativo. Contudo há o reverso “da medalha”: com o 3DP irão ser criadas novas oportunidades e novos segmentos de mercado e com isso irão nascer novos postos de trabalho (Campbell et al., 2012).

Sobre o segundo ponto, a segurança (Campbell et al., 2012), a utilização do 3DP poderá permitir um acesso mais facilitado a armas de fogo, quer pelo seu custo mais baixo, quer pela maior facilidade de fabrico, diminuindo a dependência do terrorismo dos seus fornecedores habituais. Atendendo ao aumento de complexidade que o 3DP permite, será também mais fácil produzir formas de camuflar essas armas de fogo.



Existem ainda outras vertentes sociais que podem ser analisadas relativamente ao impacto do 3DP. As receitas governamentais poderão reduzir pois apenas serão cobrados os valores respeitantes às matérias-primas (ou seja, as taxas sobre o valor acrescentado irão incidir apenas nas matérias-primas). A referir também que a aproximação da produção para junto do consumidor final irá originar uma queda acentuada da necessidade de exportações/importações e dessa forma os governos deverão adotar uma nova postura relativamente à taxação de impostos (Campbell et al., 2012). Com esta situação é eliminada parte da dependência dos países menos desenvolvidos face aos países mais desenvolvidos e com maior capacidade produtiva (por exemplo: China, Japão, Alemanha), reduzindo os desequilíbrios económicos existentes.



5. IMPACTO DO 3DP: ANÁLISE SETORIAL

Tendo por base o estudo de Almeida et al. (2015), as políticas setoriais podem ter impacto num território mais amplo do que as ações individuais. Contudo, a adoção de qualquer política ou tecnologia, seja de âmbito setorial ou individual, não está restringida à sua própria realidade, isto é, tem impacto na sua envolvente, seja de forma direta ou indireta.

É essa realidade que agora se procura explorar, ou seja, de que forma pode o 3DP influenciar os diferentes setores de atividade e como a adoção do 3DP poderá influenciar o mundo empresarial e o quotidiano das pessoas.

5.1 Análise qualitativa

Analisando estudos efetuados relativamente à aceitação empresarial sobre as tecnologias de 3DP, é possível retirar um *feedback* global bastante positivo das mesmas.

No estudo efetuado por Aguiar et al. (2014) a 3 empresas Brasileiras de setores de atividade diferentes (agrícola, fabricante de equipamentos e alimentar) é possível identificar as vantagens e desvantagens que as mesmas indicam na utilização do 3DP, sendo que as empresas analisadas recomendam a utilização desta tecnologia. Globalmente, retira-se que o 3DP quando aplicado corretamente no desenvolvimento de produtos proporciona às empresas agilidade e competitividade para inovar.

Considerando que estas empresas têm como objetivo a utilização do 3DP para o fabrico de protótipos, são identificadas na Tabela 8 as vantagens e desvantagens do 3DP segundo essa realidade.

Tabela 8 - Vantagens e desvantagens da aplicação do 3DP a protótipos em ambiente empresarial
(Aguiar et al., 2014)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Visualização do produto antes do fabrico final;• Detecção de falhas antes da produção definitiva;• Agilidade no desenvolvimento de produtos;• Redução do tempo médio de desenvolvimento de novos produtos;• Otimização do volume de trabalho.	<ul style="list-style-type: none">• Custo elevado das matérias-primas;• Impossibilidade de produzir em alguns materiais;• Custo elevado do pacote de manutenção do equipamento;• Necessidade de acabamento do produto após impressão.



Pensando na entrada do 3DP no quotidiano das pessoas, numa perspetiva a mais longo prazo face à entrada da mesma tecnologia no mundo empresarial, a mesma irá proporcionar alterações profundas na forma como o mundo industrial e os vários setores de atividade se comportam.

Geelhoed (2014) apresenta um estudo que resume o impacto nos diferentes setores de atividade como consequência da entrada do 3DP no quotidiano das populações. Um resumo adaptado desse estudo é apresentado na Tabela 9. Alguns dos setores apresentam uma visão talvez demasiadamente futurista face ao que existe atualmente, mas que pode estar mais perto de acontecer do que o expectável à primeira vista. De referir que o 3DP poderá transformar os diversos processos de forma muito distinta e a um ritmo completamente diferente de setor para setor, além de que em alguns setores a mudança poderá ocorrer mais cedo do que noutros (Campbell et al., 2012). De salientar ainda que, relativamente à análise referida e mais especificamente ao apresentado na Tabela 9, (- -) corresponde a um impacto muito negativo para essa indústria, (-) a um impacto moderadamente negativo, (=) a um impacto irrelevante, (+) um impacto moderadamente positivo e (+ +) a um impacto muito positivo para a indústria em questão. A análise é iniciada para o setor de produção pura, seguindo-se os transportes, analisando-se também o impacto noutros setores de atividade como os serviços e até a nível governamental, encontrando-se todo o resumo no Anexo I.

Tabela 9 - Impacto da entrada do 3DP no quotidiano das populações em diversos setores de atividade (Geelhoed, 2014)

Setor	Área	Impacto	Comentários
Produção	Alimentar	-	➤ A impressão de pizzas e outros semelhantes será utilizada como solução para a redução da pegada de carbono, contudo será necessário produzir a matéria-prima de outra forma. ➤ Possibilidade de impressão do seu próprio doce de açúcar ou chocolate.
	Produtos têxteis	- -	➤ Utilização do 3DP em larga escala para substituição dos atuais processos de fabrico.
	Vestuário e outros produtos acabados	- -	➤ Utilização do 3DP em larga escala para substituição dos atuais processos de fabrico.
	Madeira (à exceção de mobiliário)	-	➤ Recurso à reciclagem de madeira/papel como matéria-prima para a impressão e consequentemente menor necessidade de abate de árvores. ➤ Impressão de casas baratas em madeira para pessoas sem abrigo.



Mobiliário	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Impressão de móveis em lojas especializadas substituindo a normal compra em loja e montagem em casa.
Papel e produtos relacionados	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Recurso à reciclagem de madeira/papel como matéria-prima para a impressão e consequentemente menor necessidade de abate de árvores. ➤ Menor necessidade de embalagens.
Químicos	+ +	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Os químicos e plásticos utilizados no 3DP serão enviados diretamente pelos fornecedores para os consumidores finais. ➤ A variedade de químicos necessários será menor, contudo as vendas estarão associadas a um espectro de clientes alargado, logo eventualmente mais rentável.
Refinação de petróleo e indústrias relacionadas	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menos petróleo será necessário face à redução do transporte de bens, assim como o consumo de plástico devido à diminuição da necessidade de embalagens.
Borracha e produtos plásticos	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Produtos de borracha e de plástico serão impressos via 3DP. ➤ Haverá apenas uma fase na cadeia de abastecimento: fornecedor -> consumidor.
Pedra, argila, vidro e produtos de betão	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Produtos de vidro e cerâmica serão impressos via 3DP. ➤ Haverá apenas uma fase na cadeia de abastecimento: fornecedor -> consumidor.
Indústrias primárias de metal	- -	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Produtos de metal serão impressos via 3DP. ➤ Haverá apenas uma fase na cadeia de abastecimento: fornecedor -> consumidor.
Produtos metálicos	- -	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Peças arquitetónicas e ornamentais de metal irão passar a ser impressas. ➤ Peças como porcas, parafusos, pregos, ferramentas, etc. serão impressas à necessidade pelo consumidor, evitando a necessidade de compra em loja e a deslocação associada.
Maquinaria industrial, comercial e equipamentos de informática	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Peças de substituição serão impressas pelo usuário final. ➤ Será necessário menos equipamento mecânico em portos, assim como maquinaria de corte de metal, madeiras ou têxteis, devido à sua substituição por equipamento de 3DP. ➤ Menos equipamento para embalagem.
Equipamento eletrónico e outros componentes, exceto equipamentos de informática	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Os consumidores poderão imprimir equipamentos elétricos ou componentes próprios, pois os equipamentos de 3DP permitirão que o metal líquido solidifique à temperatura ambiente. ➤ Existirão soluções de impressão de células fotovoltaicas e baterias, o que permitirá uma gestão da energia diferente e eventualmente mais sustentável.

	Equipamento de transporte	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ O número de equipamentos (camiões) de transporte necessários irá reduzir substancialmente a partir do momento em que se começar a imprimir no local de consumo (ou próximo). ➤ A necessidade de transporte aéreo também reduzirá, logo serão necessários menos aviões. ➤ A necessidade de contentores de transporte marítimo será substancialmente menor.
	Instrumentos de medição, análise e controlo (metrologia)	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ O objetivo será a impressão de equipamentos como: relógios, telemóveis, câmaras e respetivas lentes, óculos, equipamento médico e ortopédico (próteses dentárias).
	Indústrias de transformação diversas	- -	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Com a democratização do 3DP, todos poderão imprimir joalharia, brinquedos, artigos desportivos, canetas, botões, etc. fazendo com que os fabricantes especializados passem por tempos difíceis, ainda mais quando a impressão se tornar cada vez mais barata.
Transportes, comunicação, eletricidade, gás e serviços sanitários	Transporte rodoviário	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menor necessidade de transporte de metais e produto acabado através de estrada.
	Transporte e armazenamento de mercadorias	- -	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menor necessidade de transporte e de armazenamento.
	Correios	=	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Os serviços de correio poderão ser um posto de impressão 3D onde o consumidor poderá recorrer para obter o produto final mais facilmente (caso não queira adquirir equipamento próprio). ➤ Aumento da quantidade de encomendas de matérias-primas e produto acabado enviadas para o consumidor final.
	Transporte aéreo	- -	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menor necessidade de transporte urgente ou de longa distância, via aérea.
	Transportadoras (serviços)	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menor necessidade de transporte e diminuição da quantidade de embalagens e caixas necessárias.
	Comunicações	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Outras formas de comunicação comercial, tendo em conta a diminuição das pontes entre fornecedores e consumidores.

No estudo de Geelhoed (2014), alguns setores são menos afetados do que outros, como é o caso dos serviços. É expectável que os setores responsáveis pela produção/manufatura acabem por ser muito mais afetados pela disponibilização desta tecnologia para as pessoas, isto é, a democratização da produção será naturalmente negativa sob o do ponto de vista das unidades fabris, pois a responsabilidade pela produção passa para o consumidor final.

Analisando alguns setores em particular, surgem apontamentos interessantes:



- **Transporte e Logística:** o fabrico localizado e perto do local de consumo irá originar a diminuição da complexidade das cadeias de abastecimento, eliminando diversas necessidades de transporte intermédias/finais dessas cadeias. É expectável que sejam efetuados transportes para mais consumidores (de matérias-primas, equipamentos, etc.), mas de quantidades muito inferiores;
- **Indústria de resíduos:** com a redução do desperdício a indústria de resíduos irá sofrer. É expectável que seja possível utilizar elementos em fim de vida para alimentar equipamentos de 3DP para a produção de novos componentes/produtos (reutilização);
- **Retalho e distribuição:** a indústria de retalho e distribuição tornar-se-á muito mais pequena ou desaparecerá por completo para alguns produtos. Face à possibilidade de os consumidores comprarem a licença de impressão/produção de determinado produto através da *Internet*, elimina-se a necessidade de compra do produto através dos habituais meios de retalho;
- **Armazéns:** a necessidade de armazenagem e *stock* é minimizada com os conceitos de 3DP. Dessa forma, é expectável que diversos armazéns sejam eliminados ou direcionados para outros fins;
- **Marketing e publicidade:** os fabricantes irão focar-se mais nos utilizadores finais em vez da habitual publicidade e campanhas através de retalhistas e distribuidores (que eram os anteriores intermediários das cadeias de abastecimento, possivelmente já eliminados conforme referido em cima);
- **Designers:** é nesta área que se irão gerar grandes oportunidades de negócio, com a necessidade da existência de pessoas com o *know-how* apropriado para, não só projetar novos produtos, mas também de efetuar a gestão de toda a logística associada à democratização da produção (sites de partilha de informação, patentes, monitorização da impressão etc.).

5.2 Análise quantitativa

A adoção de 3DP numa empresa altera radicalmente a forma como a mesma se comporta e como os produtos são fabricados. Num estudo levado a cabo pela consultora *PWC* em 2014 procurou-se através de um inquérito a mais de 100 fabricantes dos Estados Unidos da América,

desde pequenas empresas a multinacionais, avaliar a receptividade das mesmas sobre a tecnologia de 3DP num futuro próximo (McCutcheon et al., 2014).

Os resultados são deveras interessantes conforme demonstra a Figura 32, referente à adoção do 3DP pelas empresas. 66,7% das participantes afirmaram estarem a adotar ou a utilizar o 3DP como ferramenta de trabalho, sendo que 24,6% apenas o utilizam para prototipagem rápida, 9,6% para prototipagem e produção e cerca de 1% apenas para produção. É expectável que no futuro a percentagem de empresas a utilizar o 3DP para fabrico de produto final venha a subir bastante. A referir ainda que 8,6% das empresas inquiridas não preveem alguma vez adotar o 3DP.

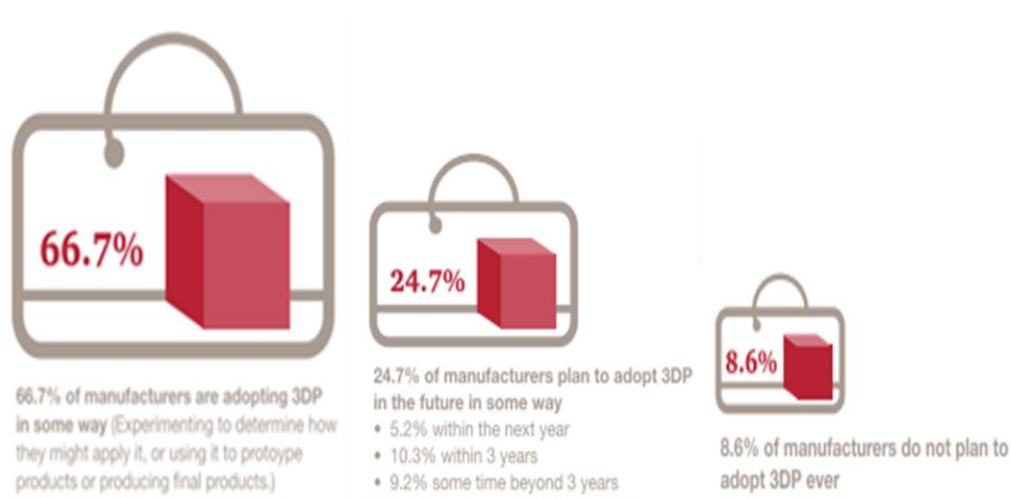


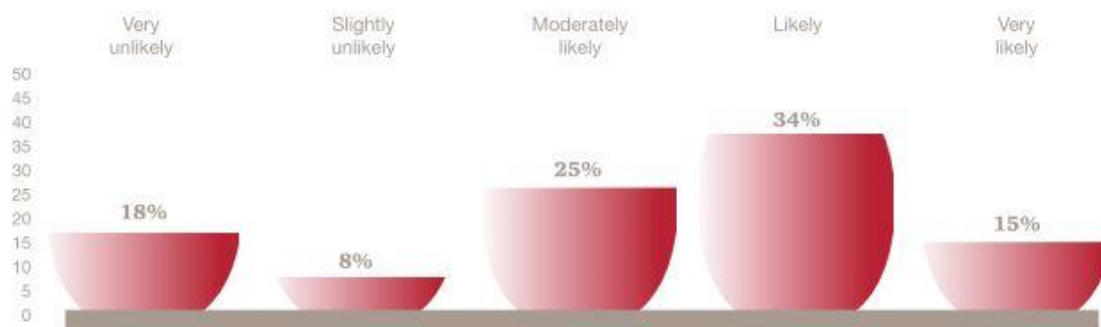
Figura 31 - Adoção do 3DP (adaptado de McCutcheon et al., 2014)

Quando abordadas sobre o tipo de produção que o 3DP será capaz de satisfazer num futuro próximo, a resposta dos inquiridos foi clara conforme demonstrado na Figura 32: um tipo de produção de baixo volume e extremamente específica, isto é, uma produção que vai de encontro ao paradigma de *Mass Customisation* e *Direct Digital Manufacturing*. 49% dos inquiridos referem que é provável ou muito provável que o 3DP venha a satisfazer este tipo de produção, por outro lado 62% referem que será muito improvável ou improvável que o 3DP venha a satisfazer as necessidades de uma produção de alto volume e normalizada. No caso específico da *Boieng* que já utiliza o 3DP na sua produção, a mesma identifica uma poupança de 30% do 3DP relativamente à produção convencional (McCutcheon et al., 2014).

Outro ponto interessante relativamente ao 3DP, e visto que ainda é considerada como uma tecnologia embrionária, é que a mesma pode ser diferenciadora no mercado atual principalmente para as pequenas empresas que apresentam ainda mais dificuldades em sobreviver. 59% das

pequenas empresas inquiridas estavam já a adotar o 3DP como tecnologia diferenciadora, comparado com os 75% das grandes empresas, que tendo mais capital para investir acaba por ser natural a adoção de tecnologias emergentes e diferenciadoras.

Q. Over the next 3–5 years, rate the likelihood that 3-D applications will be used mostly for low-volume, specialized products.



Q. Over the next 3–5 years, rate the likelihood that 3-D applications will be used for high-volume production.

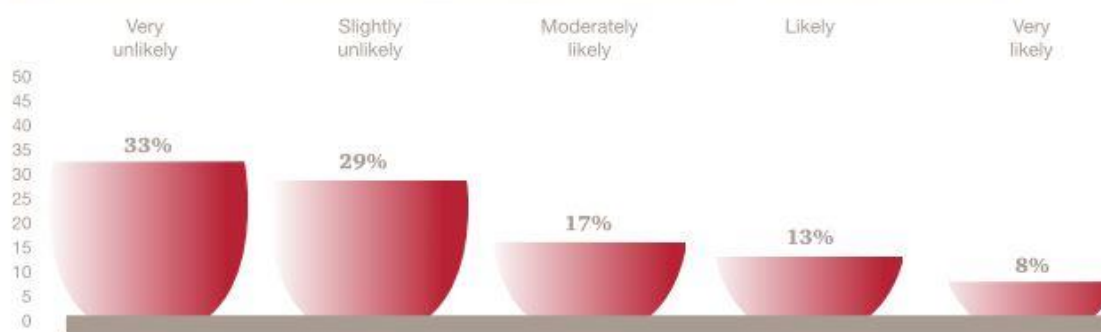


Figura 32 - Utilização futura do 3DP (McCutcheon et al., 2014)

Uma das questões tratadas ao longo desta dissertação e com as quais o 3DP ainda se debate, está relacionada com a forma como a tecnologia irá impactar a indústria convencional, as cadeias de abastecimento existentes e o Mundo em geral. Os inquiridos no estudo identificaram dois aspetos essenciais, conforme se pode verificar pela Figura 33: ameaça à propriedade intelectual com 27,8% das respostas (relacionada com a proteção de patentes e partilha de informação) e também a alteração/reestruturação das cadeias de abastecimento com 29,6% das respostas (relacionada com o facto de o consumidor final vir a ser o responsável pela produção de alguns produtos e a eliminação de muitos intermediários nas cadeias de abastecimento).

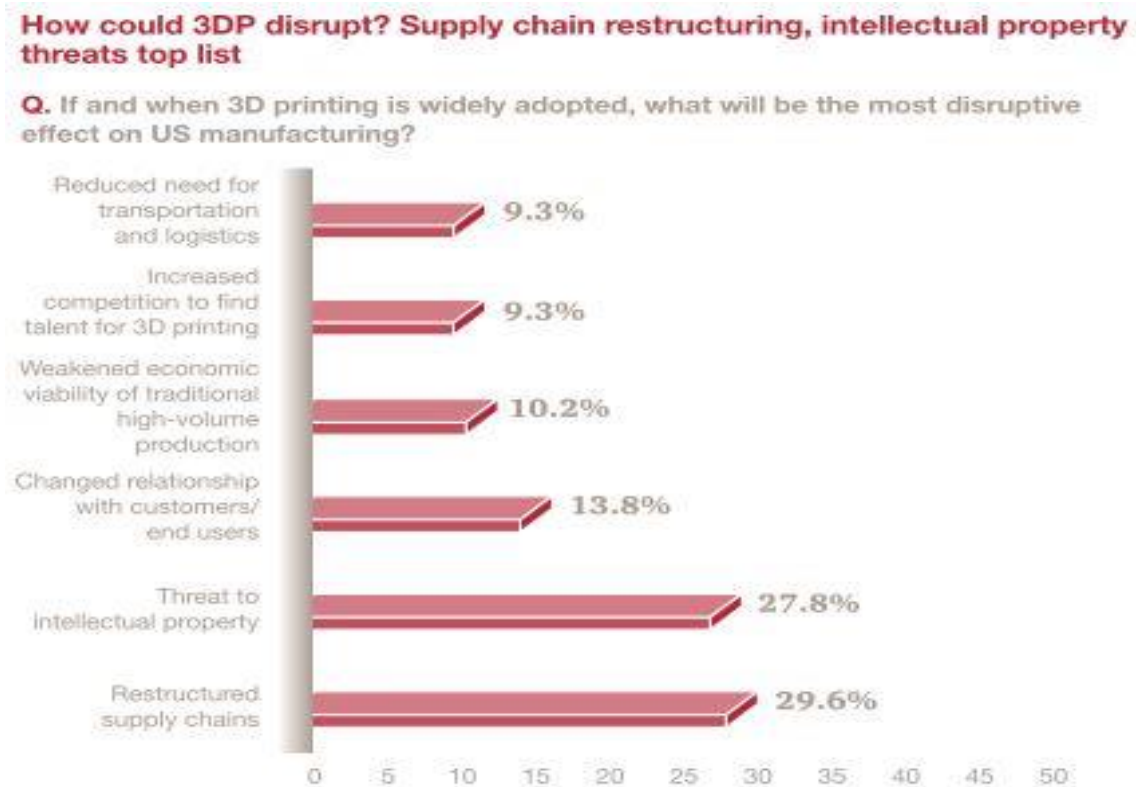


Figura 33 - Impacto do 3DP como tecnologia disruptiva (McCutcheon et al., 2014)

Uma das principais utilizações do 3DP está relacionada com a substituição e reposição de peças obsoletas e dessa forma a tecnologia poderá ser de extrema utilidade para fabricantes/utilizadores de produtos com um longo período de vida e que tenham uma grande procura por peças de substituição ao longo desse período, pois permitirá ter peças suplentes quando necessárias. Assim retira-se que indústrias que vivam à custa de muitos componentes/peças possam sair beneficiados com a utilização do 3DP, como é o caso da indústria aeroespacial e aeronáutica (McCutcheon et al., 2014).

Apesar das empresas poderem retirar grandes vantagens competitivas da utilização do 3DP, é natural que pelo menos numa fase inicial de maturação/evolução da tecnologia existam diversas barreiras para a introdução da mesma nas organizações. A Figura 34 demonstra as principais barreiras indicadas pelas empresas inquiridas. O principal fator apontado pelas empresas está relacionado com a incerteza na qualidade do produto final, nomeadamente: resistência, durabilidade, perfeição dos acabamentos, etc. Este ponto foi indicado por 47,2% das empresas.

Print quality and talent are top barriers to 3DP adoption

Q. What are the barriers to your company's in-house adoption of 3DP?

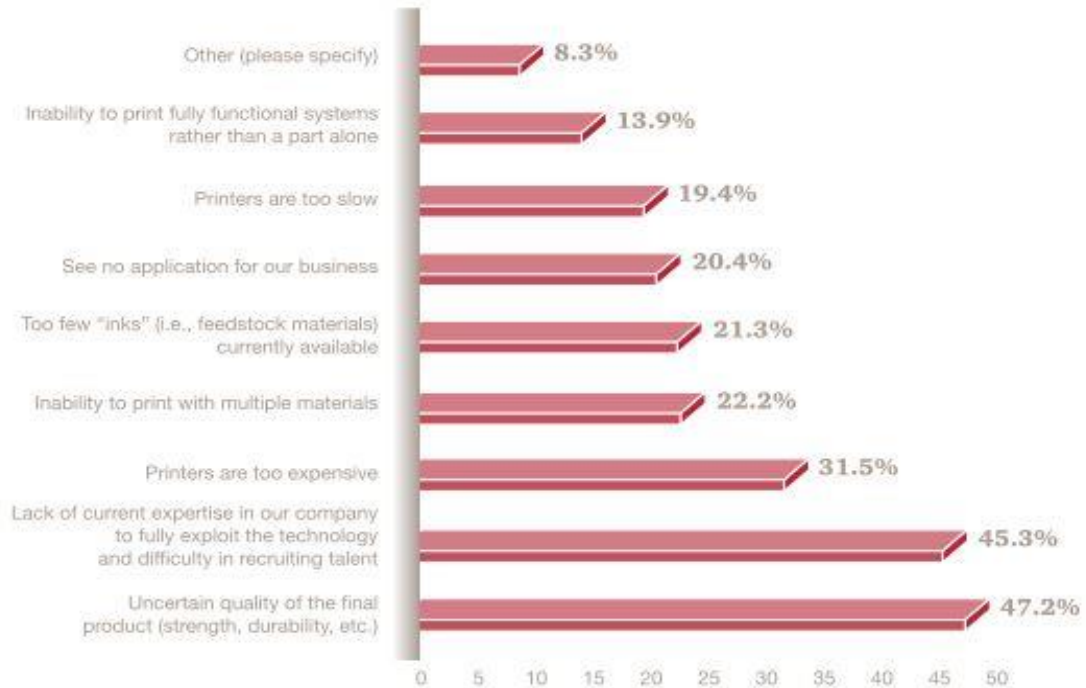


Figura 34 - Barreiras à introdução do 3DP nas empresas (McCutcheon et al., 2014)

Outra das principais barreiras está relacionada com a necessidade de mão-de-obra especializada, quer para o *design* de produtos, quer para o manuseamento das impressoras propriamente ditas. Este fator foi indicado por 45,3% dos inquiridos no estudo, devido à falta de *know-how* na empresa para explorar a tecnologia.

Alterações nos processos produtivos poderão originar também alterações nas necessidades de *headcount* das empresas, pois além da questão da necessidade de *know-how* especializado (que poderá ser ou não treinado caso exista essa capacidade na empresa), existe também a possibilidade de muitos dos trabalhos manuais e de montagem serem eliminados, diminuindo o *Man-Machine Ratio* (MMR). Analisando mais detalhadamente este ponto, poderá ser uma falsa questão pois sempre que uma nova tecnologia foi introduzida no meio industrial, sempre existiu o receio da perda de empregos. Contudo, à medida que determinadas funções deixam de ser úteis outras surgem naturalmente, e capacidade de adaptação foi algo que sempre caracterizou o ser humano.

Um elemento fundamental na formação de talentos em 3DP serão as universidades, quer através da disponibilização de conteúdos teóricos, quer com a disponibilização de impressoras



para utilização por parte dos estudantes. Este ponto será fundamental para o enraizamento da tecnologia no Mundo e na indústria (McCutcheon et al., 2014).

5.3 Análise SWOT

Em forma de conclusão e para se avaliar o posicionamento global do 3DP, não só como CP, mas em todas as suas vertentes, apresenta-se uma Análise SWOT na Tabela 10 (a verde estão identificados os pontos relacionados com as 'Forças' e 'Fraquezas' do 3DP relativamente a CP). A Análise SWOT é uma ferramenta de gestão muito utilizada pelas empresas para o diagnóstico estratégico. Neste caso será utilizado para avaliar o posicionamento do 3DP tendo por base todos os aspetos já referidos ao longo da dissertação.

O termo SWOT é composto pelas iniciais das palavras *Strenghts* (Forças), *Weaknesses* (Fraquezas), *Opportunities* (Oportunidades) e *Threats* (Ameaças) (FME, 2013). Uma 'Força' é algo que tem um impacto positivo ou que de alguma forma ofereça vantagem competitiva/valor. 'Fraqueza' é algo prejudicial ao crescimento, que elimina as vantagens competitivas resultantes das 'Forças', sendo que ambas resultam de uma análise das caraterísticas intrínsecas (internas) do 3DP. Relativamente à análise externa, ou seja, os fatores capazes de influenciar positiva ou negativamente as 'Forças' e 'Fraquezas' do 3DP, existem as 'Oportunidades' que podem surgir de variados motivos e resultantes do mercado, alterações tecnológicas, etc. isto é, oportunidades que podem resultar em crescimento a partir do momento em que esse ponto é desenvolvido. Por outro lado, 'Ameaças' é algo que poderá trazer risco para o elemento em análise, neste caso o 3DP e que de alguma forma estará fora do controlo interno. Desta forma, os objetivos deverão ser:

- Fortalecer as oportunidades para ganhar vantagem competitiva;
- Converter ameaças ou fraquezas em oportunidades ou forças.



Tabela 10 - Análise SWOT sobre o posicionamento do 3DP

Ambiente interno		Ambiente externo	
Fraquezas	<ul style="list-style-type: none">• Preço dos equipamentos de impressão;• Custo elevado do pacote de manutenção dos equipamentos;• Custo elevado e pouca diversidade de matérias-primas;• Limitações de tamanho: performance reduzida quando se trata da produção de grandes componentes;• Limitações de escala: necessidade de aumento da velocidade de produção para aumento da competitividade para grandes volumes de produção;• Produção mais lenta: necessidades energéticas globais superiores devido a tempos de processo superiores;• Limitações na impressão multimaterial e em alguns materiais (Nano materiais);• Dificuldades na utilização de materiais recicláveis;• Falhas de qualidade nos acabamentos do produto final, resistência e durabilidade;• Necessidade de acabamento do produto após impressão.	Ameaças	<ul style="list-style-type: none">• Desinteresse dos governos na criação de programas de suporte à investigação da tecnologia;• Receitas governamentais reduzidas;• Diminuição das importações/exportações de produtos;• Desconhecimento dos <i>designers</i> e produtores sobre as vantagens específicas da tecnologia;• Dificuldade em reunir um conjunto de especialistas e contribuidores para o desenvolvimento e maturação da tecnologia;• Diminuição das necessidades globais de mão-de-obra;• Necessidade de mão-de-obra específica e com conhecimento apropriado;• Problemas ao nível da certificação de patentes e proteção de dados;• Diminuição da segurança devido ao acesso mais facilitado a armas;• Falta de aplicabilidade para determinados setores de atividade;• Perturbação de setores industriais estáveis.



Forças	<ul style="list-style-type: none">• Permite o rápido e ágil desenvolvimento do produto (prototipagem);• Descrição prévia do produto antes do fabrico (prototipagem);• Detecção de falhas antes da produção definitiva (prototipagem);• Diminuição dos custos associados à complexidade do produto;• Visualização do produto antes do fabrico final;• Eliminação dos custos com ferramentas;• Uso eficiente de materiais através da redução da quantidade de material desperdiçado;• Redução da quantidade de processos de montagem;• Elevada customização dos produtos, aumentando a flexibilidade das linhas produtivas;• Produção 'on demand', eliminando as necessidades de stocks e de sobressalentes;• Redução das emissões de carbono obtidas à custa da redução no transporte de materiais;• Redução das emissões de carbono obtidas à custa do consumo energético necessário durante todo o ciclo de vida (não apenas na produção);• Gastos energéticos por unidade de tempo menores relativamente aos processos tradicionais;• Minimiza a utilização de químicos;• Evita a exposição a longo prazo a ruídos e gases dos processos tradicionais de produção;• Fabrico de peças mais leves e de fácil transporte;• Menores necessidades de plásticos e embalagens;• Descentralização da produção com impacto na necessidade de transporte;• Produção mais próxima do consumidor final;• Possibilidade de fabrico de peça específica que garanta o reuso de produtos já existentes;• Maior funcionalidade do produto final;• Competitivo para um volume elevado de produção mista;• Fácil partilha de produtos através da <i>Internet</i>.	Oportunidades	<ul style="list-style-type: none">• Aumento da eficiência (velocidade de processamento) com impacto na redução dos consumos energéticos;• Garantia de reutilização e reciclagem dos produtos em fim de vida;• Possibilidade de <i>design</i> dos produtos de forma compatível com o ambiente;• Facilidade na gestão da incerteza da procura;• Criação de uma nova indústria especializada no <i>design</i> de produtos com mão-de-obra específica;• Criação de novos tipos de postos de trabalho: de <i>design</i> e de manuseamento da tecnologia;• Transações de <i>design</i> em vez de produtos;• Criação de uma nova indústria de produção de impressoras 3D e de materiais necessários à produção;• Relevante para fins de pesquisa e ensino;• Envolvimento das universidades no desenvolvimento da tecnologia;• Democratização da produção, permitindo o acesso de zonas remotas a bens de difícil acesso;• Eliminação da dependência dos países menos desenvolvidos dos mais desenvolvidos.
---------------	--	----------------------	--



6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6.1 Considerações finais

Não existirá nenhuma medida que encaixe na perfeição em todas as vertentes do desenvolvimento sustentável, contudo cada uma delas poderá contribuir de uma forma ou outra para que o objetivo global seja alcançado. As oportunidades e os desafios que a necessidade para a sustentabilidade trouxeram ao mundo atual, implicam que todos os envolvidos e partes interessadas, incluindo governos, universidades, setores industriais, empresas e cada um de nós individualmente, estejam preparados para assumir as suas responsabilidades, com o objetivo de desenvolver e implementar políticas sustentáveis, estratégias e metodologias de CP, e também uma monitorização realista dos resultados obtidos.

Apesar da dificuldade que é prever o impacto de determinada tecnologia, é possível identificar um potencial significativo do 3DP mesmo que apenas de forma grosseira. O 3DP terá um impacto profundo na indústria e na forma como produzimos, assim como na proteção ambiental como tecnologia de *Cleaner Production* (CP). Assim o futuro é difícil de prever, sendo necessário planear e prever de forma adequada a entrada e fixação da tecnologia disruptiva de 3DP (AM) na nossa sociedade. É crucial que técnicos e governos comecem o diálogo de forma a antecipar e precaver as alterações que o 3DP trará para o estado atual das economias e do Mundo em geral.

O impacto do 3DP na produção, no ambiente, na economia e políticas sociais irá ocorrer de forma gradual ao longo das próximas décadas, como se verificou com a *Internet* e os computadores. Esta tecnologia significará um reforço das medidas internacionais relativamente aos desafios ambientais, especialmente as alterações climáticas, isto é, será um novo impulso na redução da pegada ecológica que atualmente existe assim como na minimização da luta por recursos naturais.

O 3DP está a caminho de deixar de ser uma tecnologia meramente emergente, para passar a ser uma tecnologia verdadeiramente transformadora. A sua capacidade de permitir o fabrico (impressão) de quase qualquer objeto terá fortes repercussões em toda a nossa sociedade. O 3DP não irá resolver todos os problemas da produção convencional, nem haverá razão para pensar que irá substituir na totalidade todos os métodos tradicionais de fabrico, contudo é claro que em



conjunto com as restantes formas de fabrico, poderá contribuir para a performance, inovação e crescimento de uma organização através de uma das suas maiores virtudes: a flexibilidade. É expectável que num futuro próximo o 3DP seja capaz de produzir em massa e esteja cada vez mais democratizado, isto é, acessível a todos.

As questões que se colocaram à partida da investigação foram:

- Será a impressão 3D capaz de revolucionar a forma como iremos produzir num futuro próximo?
- A impressão 3D terá o potencial de suportar o novo paradigma de *Cleaner Production* (CP)?

Relativamente à primeira questão, é possível afirmar que a tecnologia de 3DP é sem dúvida uma forte alternativa aos métodos tradicionais de fabrico como resposta ao novo paradigma produtivo que se tem vindo a desenvolver (*Direct Digital Manufacturing*). Conforme já referido, a mesma proporcionará a democratização da produção e eventualmente a eliminação da dependência dos países menos desenvolvidos dos mais desenvolvidos relativamente à capacidade produtiva, assim como uma maior funcionalidade do produto final pois estará altamente customizado e direccionado para o consumidor final.

Relativamente à segunda questão, relacionada com a Produção mais limpa (CP), é possível afirmar que diversas características do 3DP vão de encontro a esse paradigma, como por exemplo: menores necessidades de plásticos e embalagens; descentralização da produção com impacto nas necessidades de transporte; uso mais eficiente das matérias primas tendo por base a diminuição do desperdício; eliminação da necessidade de ferramentas. Dessa forma é possível afirmar que existe uma correlação entre o 3DP e CP, não evitando que existam alguns pontos a serem desenvolvidos como a velocidade de processamento dos equipamentos e a utilização de materiais recicláveis na produção.

6.2 Sugestões de trabalho futuro

Relativamente às perspectivas de desenvolvimento futuras da tecnologia e do tema, a universidade é uma parte fundamental na análise do verdadeiro potencial do 3DP. De forma a avaliar mais detalhadamente as questões ao nível da sustentabilidade seria conveniente efetuar uma análise de ciclo de vida relativamente a cada um dos tipos de processos de 3DP



comparativamente aos processos convencionais de fabrico. Com isto será possível projetar o ciclo de vida de um produto fabricado através desta tecnologia. A universidade também poderá ter uma palavra a dizer relativamente ao desenvolvimento da tecnologia, suportando a investigação da mesma e eventualmente inserindo conteúdos sobre o 3DP no ensino.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3D SYSTEMS. (2015). *Manufacturing The Future*. Retrieved from <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/downloads/DDD - Manufacturing the Future - May 2014.pdf>
- Abdullah, J., & Hassan, A. Y. (2001). Rapid Prototyping in Orthopaedics: Principles and Applications. *Aerospace*, 547–561. http://doi.org/10.1142/9789812775337_0034
- Aero. (2015). Additive Manufacturing.
- Aguiar, M. C., Ravazi, R. F., Herrera, V. É., Danilo, & Detregiachi Filho, É. (2014). Avaliação da prototipagem rápida em impressão 3D como uma inovação tecnológica aplicada ao desenvolvimento de produtos - Um estudo multicaso. *34 Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 1–16.
- Almeida, C. M. V. B., Agostinho, F., Giannetti, B. F., & Huisingh, D. (2015). Integrating cleaner production into sustainability strategies: An introduction to this special volume. *Journal of Cleaner Production*, 96, 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.083>
- Bak, D. (2013). Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter. *Assembly Automation*, 23(4), 340–345. <http://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>
- Bossel, H. (1999). *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications*. International Institute for Sustainable Development (Vol. 68). Retrieved from <http://www.ulb.ac.be/ceese/STAFF/Tom/bossel.pdf>
- Bourell, D., Leu, M., & Rosen David; (2009). Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing, 102.
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2012). Strategic Foresight Report, 3–7.
- Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J. G., & Thiede, S. (2015). Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*, 107, 615–625. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.009>
- Chee Kai Chua, Kah Fai Leong, Chu Sing Lim (2010). *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. World Scientific, London.
- Cotteleer, M. J. (2014). 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth. *SIMT Additive Manufacturing Symposium*, 1–23. Retrieved from



- http://simt.com/uploads/4881/SIMT_AM_Conference_Keynote.pdf
- Dawood, A., Marti, B. M., Sauret-Jackson, V., & Darwood, A. (2015). 3D printing in dentistry. *Bdj*, 219(11), 521–529. <http://doi.org/10.1038/sj.bdj.2015.914>
- Ehrenfeld, J. R. (2005). Eco-efficiency: Philosophy, Theory, and Tools. *Journal of Industrial Ecology*, 9(4), 6–8. <http://doi.org/10.1162/108819805775248070>
- Elkington, J. (1994). Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. *California Management Review*, 36(2), 90–100. <http://doi.org/10.2307/41165746>
- Ezeiruaku, S. (2015). *Review of 3D Printing Technologies and Characterization of MakerBot Replicator Desktop 3D Printer*.
- FME. (2013). *SWOT Analysis: Strategy Skills*. *Free-Management-Ebooks*. <http://doi.org/http://www.free-management-ebooks.com/dldebk-pdf/fme-pestle-analysis.pdf>
- Geelhoed, A. (2014). The 3D Printing Revolution. *CCR Magazine / Business Information Industry Association*, 1–3, 1–13. Retrieved from <http://www.biiia.com/wp-content/uploads/2013/11/3D-printing-and-credit-risk-management.pdf>
- Gibson, I., Rosen, D. W. D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. *Media* (Vol. 54). <http://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- Glavič, P., & Lukman, R. (2007). Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, 15, 1875–1885. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.12.006>
- Goldberg, D. (2014). The History of 3D Printing. *Product Design & Development*, 14–17. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/17506200710779521>
- Goldstine, H. H., & Goldstine, A. (1996). Electronic numerical integrator and computer (ENIAC). *IEEE Annals of the History of Computing*, 18, 10–16. <http://doi.org/10.1109/85.476557>
- Groover, M. P. (2008). Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing. In *Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing* (p. 290).
- Herbert, N., Simpson, D., Spence, W. D., & Ion, W. (2005). A preliminary investigation into the development of 3D printing of prosthetic sockets. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 42, 141–146. <http://doi.org/10.1682/JRRD.2004.08.0134>
- Hull, C. W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. *US*



- Patent 4,575,330*. Retrieved from <http://www.google.com/patents/US4575330>
- Huppel, G., & Ishikawa, M. (2005). A framework for quantified eco-efficiency analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 9, 25–41. <http://doi.org/10.1162/108819805775247882>
- Institute of Environmental Engineering Kaunas University of Technology. (2000). *Introduction To Cleaner Production (CP): concepts and practice*.
- Jewell, C. (2013). 3D Printing and the Future of Stuff. *WIPO Magazine*, 2–6.
- Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52, 1770–1773. <http://doi.org/10.1063/1.1136492>
- Lamonica, M. (MIT T. R. (2015). Additive Manufacturing, pp. 1–4.
- Le Bourhis, F., Kerbrat, O., Hascoet, J.-Y., & Mognol, P. (2013). Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 1927–1939. <http://doi.org/10.1007/s00170-013-5151-2>
- McCutcheon, R., Pethick, R., Bono, B., & Thut, M. (2014). 3D printing and the new shape of industrial manufacturing, (June), 8. Retrieved from http://www.pwc.com/us/en/industrial-products/assets/3d-printing-next_manufacturing-chart-pack-pwc.pdf
- Moza, Z., Kisakis, K., Kechagias, J., & Vaxevanidis, N. M. (2015). Medical applications of 3D printing-A dimensional accuracy investigation of low cost 3D printing. *International Conference on Food and Biosystems Engineering*.
- Oliveira Neto, G. C. de, Godinho Filho, M., Ganga, G. M. D., Naas, I. A., & Vendrametto, O. (2015). Princípios e ferramentas da produção mais limpa: um estudo exploratório em empresas brasileiras. *Gestão & Produção*, 22, 326–344. <http://doi.org/10.1590/0104-530x1468-14>
- Peddie, J. (2013). *The History of Visual Magic in Computers. The History of Visual Magic in Computers: How Beautiful Images Are Made in CAD, 3D, VR and AR*. London: Springer London. <http://doi.org/10.1007/978-1-4471-4932-3>
- Pham, D. T., & Gault, R. S. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38, 1257–1287. [http://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)
- Preston, F. (2013). Printing with a greener ink. *The World Today*, 69, 18.
- Rayna, T., & Striukova, L. (2014). The impact of 3D printing technologies on business model



- innovation. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 261, 119–261.
http://doi.org/10.1007/978-3-319-04313-5_11
- Salonitis, K., & Stavropoulos, P. (2013). On the integration of the CAx systems towards sustainable production. *Procedia CIRP*, 9, 115–120. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.178>
- Sangani, K. (2013). Make it to fake it. *Engineering & Technology*, 8, 38–41.
<http://doi.org/10.1049/et.2013.0901>
- Silva, A. L. E., Moraes, J. A. R., & Machado, Ê. L. (2015). Proposta de produção mais limpa voltada às práticas de ecodesign e logística reversa. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 20, 29–37.
<http://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000087843>
- Smith, C. M., Stone, A. L., Parkhill, R. L., Stewart, R. L., Simpkins, M. W., Kachurin, A. M., ... Williams, S. K. (2004). Three-Dimensional BioAssembly Tool for Generating Viable Tissue-Engineered Constructs. *Tissue Engineering*, 10, 1566–1576.
<http://doi.org/10.1089/ten.2004.10.1566>
- The Economist. (2011). 3D printing - The printed world. Retrieved from
<http://www.economist.com/node/18114221>
- Tseng, M. L., Lin, R. J., Lin, Y. H., Chen, R. H., & Tan, K. (2014). Close-loop or open hierarchical structures in green supply chain management under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 41, 3250–3260. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.062>
- United Nations. (2007). *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. Thrid Edition*. <http://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.002>
- Vachon, S. (2007). Green supply chain practices and the selection of environmental technologies. *International Journal of Production Research*, 45, 4357–4379.
<http://doi.org/10.1080/00207540701440303>
- Veleva, & Ellenbecker, M. (2001). Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, 9, 519–549. [http://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00010-5](http://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00010-5)
- Veleva, Hart, M., Greiner, T., & Crumbley, C. (2001). Indicators of sustainable production. *Journal of Cleaner Production*, 9(5), 447–452. [http://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00004-X](http://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00004-X)
- Weber, C. L., Pena, V., Micali, M. K., Yglesias, E., Rood, S., Scott, J. A., & Lal, B. (2013). The Role of the National Science Foundation in the Origin and Evolution of Additive Manufacturing in the United States, 175 pages.



- Wimmer, R., Steyrer, B., Woess, J., Koddenberg, T., & Mundigler, N. (2015). 3D Printing and Wood, *11*, 144–149.
- Wohlers. (2014). Wohlers Associates. *Wohlers Associates, Inc.* Retrieved from <http://www.wohlersassociates.com/JanFeb10TC.htm>
- Wohlers, T. (1995). Future potential of rapid prototyping and manufacturing around the world. *Rapid Prototyping Journal*, *1*, 4–10. <http://doi.org/10.1108/13552549510146630>
- Wohlers, T. (2012). *Wohlers Report 2012. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Wohlers Report 2012.*
- Wohlers, T. (2016). *Wohlers Report 2016. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Wohlers Report 2016.*
- Yan, X., & Gu, P. (1996). A review of rapid prototyping technology and systems. *Computer Aided Design*, *28*(4), 307–318.
- Yan, Y., Li, S., Zhang, R., Lin, F., Wu, R., Lu, Q., ... Wang, X. (2009). Rapid Prototyping and Manufacturing Technology: Principle, Representative Technics, Applications, and Development Trends. *Tsinghua Science and Technology*, *14*, 1–12. [http://doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70001-X](http://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70001-X)
- Yongnian, Y. a N., Shengjie, L. I., Renji, Z., & Feng, L. I. N. (2009). Rapid Prototyping and Manufacturing Technology: Principle , Representative Technics , Applications , and Development Trends, *14*, 1–12.
- Zeng, S. X., Meng, X. H., Yin, H. T., Tam, C. M., & Sun, L. (2010). Impact of cleaner production on business performance. *Journal of Cleaner Production*, *18*, 975–983. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.019>



ANEXO I – TABELA 9

Setor	Área	Impacto	Comentários
Produção	Alimentar	-	<ul style="list-style-type: none">➤ A impressão de pizzas e outros semelhantes será utilizada como solução para a redução da pegada de carbono, contudo será necessário produzir a matéria-prima de outra forma.➤ Possibilidade de impressão do seu próprio doce de açúcar ou chocolate.
	Produtos têxteis	- -	<ul style="list-style-type: none">➤ Utilização do 3DP em larga escala para substituição dos atuais processos de fabrico.
	Vestuário e outros produtos acabados	- -	<ul style="list-style-type: none">➤ Utilização do 3DP em larga escala para substituição dos atuais processos de fabrico.
	Madeira (à exceção de mobiliário)	-	<ul style="list-style-type: none">➤ Recurso à reciclagem de madeira/papel como matéria-prima para a impressão e consequentemente menor necessidade de abate de árvores.➤ Impressão de casas baratas em madeira para pessoas sem abrigo.
	Mobiliário	-	<ul style="list-style-type: none">➤ Impressão de móveis em lojas especializadas substituindo a normal compra em loja e montagem em casa.
	Papel e produtos relacionados	-	<ul style="list-style-type: none">➤ Recurso à reciclagem de madeira/papel como matéria-prima para a impressão e consequentemente menor necessidade de abate de árvores.➤ Menor necessidade de embalagens.
	Químicos	+ +	<ul style="list-style-type: none">➤ Os químicos e plásticos utilizados no 3DP serão enviados diretamente pelos fornecedores para os consumidores finais.➤ A variedade de químicos necessários será menor, contudo as vendas estarão associadas a um espectro de clientes alargado, logo eventualmente mais rentável.
	Refinação de petróleo e indústrias relacionadas	-	<ul style="list-style-type: none">➤ Menos petróleo será necessário face à redução do transporte de bens, assim como o consumo de plástico devido à diminuição da necessidade de embalagens.
	Borracha e produtos plásticos	-	<ul style="list-style-type: none">➤ Produtos de borracha e de plástico serão impressos via 3DP.➤ Haverá apenas uma fase na cadeia de abastecimento: fornecedor -> consumidor.
	Pedra, argila, vidro e produtos de betão	-	<ul style="list-style-type: none">➤ Produtos de vidro e cerâmica serão impressos via 3DP.➤ Haverá apenas uma fase na cadeia de abastecimento: fornecedor -> consumidor.



	Indústrias primárias de metal	■ ■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Produtos de metal serão impressos via 3DP. ➤ Haverá apenas uma fase na cadeia de abastecimento: fornecedor -> consumidor.
	Produtos metálicos	■ ■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Peças arquitetônicas e ornamentais de metal irão passar a ser impressas. ➤ Peças como porcas, parafusos, pregos, ferramentas, etc. serão impressas à necessidade pelo consumidor, evitando a necessidade de compra em loja e a deslocação associada.
	Maquinaria industrial, comercial e equipamentos de informática	■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Peças de substituição serão impressas pelo usuário final. ➤ Será necessário menos equipamento mecânico em portos, assim como maquinaria de corte de metal, madeiras ou têxteis, devido à sua substituição por equipamento de 3DP. ➤ Menos equipamento para embalagem.
	Equipamento eletrônico e outros componentes, exceto equipamentos de informática	■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Os consumidores poderão imprimir equipamentos elétricos ou componentes próprios, pois os equipamentos de 3DP permitirão que o metal líquido solidifique à temperatura ambiente. ➤ Existirão soluções de impressão de células fotovoltaicas e baterias, o que permitirá uma gestão da energia diferente e eventualmente mais sustentável.
	Equipamento de transporte	■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ O número de equipamentos (camiões) de transporte necessários irá reduzir substancialmente a partir do momento em que se começar a imprimir no local de consumo (ou próximo). ➤ A necessidade de transporte aéreo também reduzirá, logo serão necessários menos aviões. ➤ A necessidade de contentores de transporte marítimo será substancialmente menor.
	Instrumentos de medição, análise e controlo (metrologia)	■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ O objetivo será a impressão de equipamentos como: relógios, telemóveis, câmaras e respetivas lentes, óculos, equipamento médico e ortopédico (próteses dentárias).
	Indústrias de transformação diversas	■ ■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Com a democratização do 3DP, todos poderão imprimir joalharia, brinquedos, artigos desportivos, canetas, botões, etc. fazendo com que os fabricantes especializados passem por tempos difíceis, ainda mais quando a impressão se tornar cada vez mais barata.
Transportes, comunicação, eletricidade, gás e serviços sanitários	Transporte rodoviário	■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menor necessidade de transporte de metais e produto acabado através de estrada.
	Transporte e armazenamento de mercadorias	■ ■	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menor necessidade de transporte e de armazenamento.
	Correios	==	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Os serviços de correio poderão ser um posto de impressão 3D onde o consumidor poderá recorrer para obter o produto final mais facilmente (caso não queira adquirir equipamento próprio).



			➤ Aumento da quantidade de encomendas de matérias-primas e produto acabado enviadas para o consumidor final.
	Transporte aéreo	- -	➤ Menor necessidade de transporte urgente ou de longa distância, via aérea.
	Transportadoras (serviços)	-	➤ Menor necessidade de transporte e diminuição da quantidade de embalagens e caixas necessárias.
	Comunicações	-	➤ Outras formas de comunicação comercial, tendo em conta a diminuição das pontes entre fornecedores e consumidores.
Agricultura, Silvicultura e Pescas	Produção de animais	=	➤ A impressão de carne será utilizada para reduzir a pegada de carbono, contudo será necessário produzir a matéria-prima de outra forma.
	Silvicultura	-	➤ Recurso à reciclagem de madeira/papel como matéria-prima para a impressão e consequentemente menor necessidade de abate de árvores.
Mineração	Mineração de metais	+	➤ 3DP junto da localização da mina, permitindo a impressão de objetos metálicos e expedição direta para o consumidor final. ➤ Preço do produto irá baixar.
	Extração de petróleo e gás	-	➤ Será necessário menos petróleo face à redução no transporte. ➤ Diminuição das necessidades de plástico devido à menor necessidade de embalagens.
Construção	Construção de edifícios	-	➤ Construção mais rápida com o 3DP. ➤ A falta de utilização de armazéns assim como de novas unidades industriais fará com que a construção de novas seja desnecessária. ➤ A necessidade de locais de retalho (<i>shoppings</i>) será menor, colocando pressão nos preços praticados devido à baixa procura. ➤ O preço das habitações poderá baixar.
	Construção de obras de arte	=	➤ O 3DP proporcionará o aumento da complexidade das obras de arte assim como a diminuição do tempo de construção associado.
Comércio grossista	Comércio grossista de bens duráveis	-	➤ Os consumidores irão comprar diretamente ao proprietário o modelo do bem durável que pretendem e imprimi-lo com a necessidade (baixa frequência).
	Comércio grossista de bens não duráveis	- -	➤ Os consumidores irão comprar diretamente ao proprietário o modelo do bem durável que pretendem e imprimi-lo com a necessidade (elevada frequência).
Comércio retalhista	Materiais de construção, bricolage e vendedores de casas móveis (módulos)	-	➤ Casas mais baratas poderão ser impressas, com foco na necessidade de espaços específicos (sem padrão definido). ➤ Capacidade de impressão pelos consumidores irá abrandar as vendas de materiais.



	Lojas de mercadorias	■ ■	➤ Menos produtos serão vendidos através das lojas.
	Lojas alimentares	■	➤ A impressão 3D será utilizada como solução para a redução da pegada de carbono.
	Vendedores de automóveis e postos de abastecimento de combustível	■ ■	➤ Será gerado um grande impacto negativo para o setor quando formos capazes de imprimir as nossas próprias baterias recarregáveis utilizadas nos carros. ➤ A impressão de peças de substituição será possível pelos mecânicos, assim como pelos consumidores (basta que adicionalmente tenham a habilidade de a substituir no veículo).
	Lojas de vestuário e acessórios	■ ■	➤ O 3DP permitirá a impressão de roupas, sapatos e acessórios. ➤ Utilizado em grande escala irá originar a substituição dos processos convencionais de fabrico, assim como das lojas de venda habituais.
	Mobiliário doméstico, mobiliário e lojas de equipamentos	■	➤ Os consumidores poderão imprimir partes de mobiliário e efetuar a respetiva montagem (ou eventualmente imprimir o modelo inteiro em loja especializada).
	Restauração	++	➤ As pessoas terão mais tempo livre e dinheiro disponível, já que os preços globais dos produtos impressos permitirão uma poupança interessante.
	Retalho indiferenciado	■	➤ O retalho em geral será prejudicado pelo 3DP.
Finanças, seguros e imóveis	Seguradoras	■ ■	➤ Menos seguros vendidos para os transportes. ➤ Menor necessidade de assegurar a produção, passando grande parte do risco para o consumidor.
	Agentes de serviços e corretoras	■ ■	➤ Menos seguros vendidos para os transportes. ➤ Menor necessidade de assegurar a produção, passando grande parte do risco para o consumidor.
	Imóveis	■ ■	➤ Os preços dos bens imobiliários relacionados com a produção, armazenamento e distribuição irão baixar assim que a disponibilidade de edifícios vazios se tornar cada vez maior.
Serviços	Hotéis, residenciais, acampamentos e outros alojamentos	■	➤ Existirão menos viagens de negócios logo poderá haver um impacto negativo neste setor de atividade. ➤ De outro ponto de vista, as pessoas terão mais tempo disponível e maior capacidade de compra logo poderão utilizar mais frequentemente alojamentos para recreio/férias.
	Serviços pessoais	=	➤ Por exemplo, a reparação de sapatos será menos necessária quando as pessoas começarem a imprimir face às suas próprias necessidades.
	Serviços prestados às empresas	■	➤ Empresas de publicidade terão de se adaptar e focar-se no consumidor final em vez de nas empresas de retalho.



	Reparação automóvel, serviços e estacionamento	-	➤ Partes suplentes poderão ser impressas por qualquer pessoa (além do revendedor) e existirão dessa forma mais oportunidades para lojas de reparação não oficiais.
	Serviços de reparação indiferenciados	-	➤ Partes suplentes poderão ser impressas por qualquer pessoa (além do revendedor) e existirão dessa forma mais oportunidades para lojas de reparação não oficiais.
	Serviços de saúde	+	➤ Dependendo do serviço fornecido, o mundo dos serviços de saúde irá modificar-se e uma grande adaptação será necessária. ➤ Órgãos poderão ser impressos e não serão necessárias tantas doações de órgãos.
	Serviços legais	++	➤ Serão mais solicitados para combater a pirataria e a proteção de patentes e direitos de autor.
	Serviços de educação	++	➤ Ajustes nos sistemas de educação serão necessários de forma a existir formação ao nível do 3DP, resultando numa população mais consciente e capaz de utilizar <i>software</i> e <i>hardware</i> relacionado com a tecnologia emergente que é o 3DP.
	Museus, galerias de arte e jardins zoológicos e botânicos	++	➤ Impressão de objetos perdidos ou roubados será possível dependendo do tipo de arte. ➤ As pessoas poderão reproduzir cópias das peças originais de arte quando as mesmas foram 'scanizadas' em modelo 3DP.
	Associações	++	➤ As organizações relacionadas com a gestão do crédito irão crescer devido ao aumento do risco para certos setores de atividade.
	Engenharia, contabilidade, Investigação, Gestão e Serviços relacionados	+	➤ O mundo da Engenharia/Arquitetura irá mudar radicalmente e necessitará de se adaptar à existência do 3DP, contudo existirão diversas oportunidades. ➤ A investigação e desenvolvimento também se irá alterar na medida em que poderá ser possível recorrer ao 3DP como suporte à própria investigação, obtendo resultados mais rápidos.
Administração pública	Famílias	+	➤ Quando os modelos de 3DP estiverem disponíveis para impressão, muito se irá alterar, permitindo às famílias efetuar poupanças consideráveis.
	Governo Geral, Executivo e Legislativo, exceto Finanças	--	➤ Os direitos de autor necessitam de ser protegidos, a impressão de armas necessita de ser controlada e nova legislação será necessária (exemplo: para a impressão de medicamentos). ➤ Impressão de moedas deverá ser controlada e prevenida ou as moedas deverão ser abandonadas como meio de pagamento.
	Justiça, Ordem Pública e Segurança	--	➤ Novos métodos de deteção de armas devem ser considerados e desenvolvidos. ➤ Possibilidade de falsificação de moedas, chaves de alta segurança e bens perigosos.



	Finanças públicas, tributação e política monetária.	- -	<ul style="list-style-type: none">➤ As receitas de impostos reduzirão substancialmente. Os governos deverão preparar-se para aplicar outro tipo de impostos.➤ Os impostos de importação aplicáveis ao 3DP irão alterar-se ou até desaparecer.
	Administração da qualidade Ambiental e Programas de Habitação	+	<ul style="list-style-type: none">➤ A gestão de resíduos irá alterar-se devido à menor quantidade de resíduos gerados.➤ Casas para pessoas necessitadas poderão ser impressas e movidas facilmente.
	Segurança Nacional e Assuntos Internacionais	- -	<ul style="list-style-type: none">➤ Novos métodos de deteção de armas devem ser considerados e desenvolvidos.➤ Possibilidade de falsificação de moedas, chaves de alta segurança e bens perigosos.